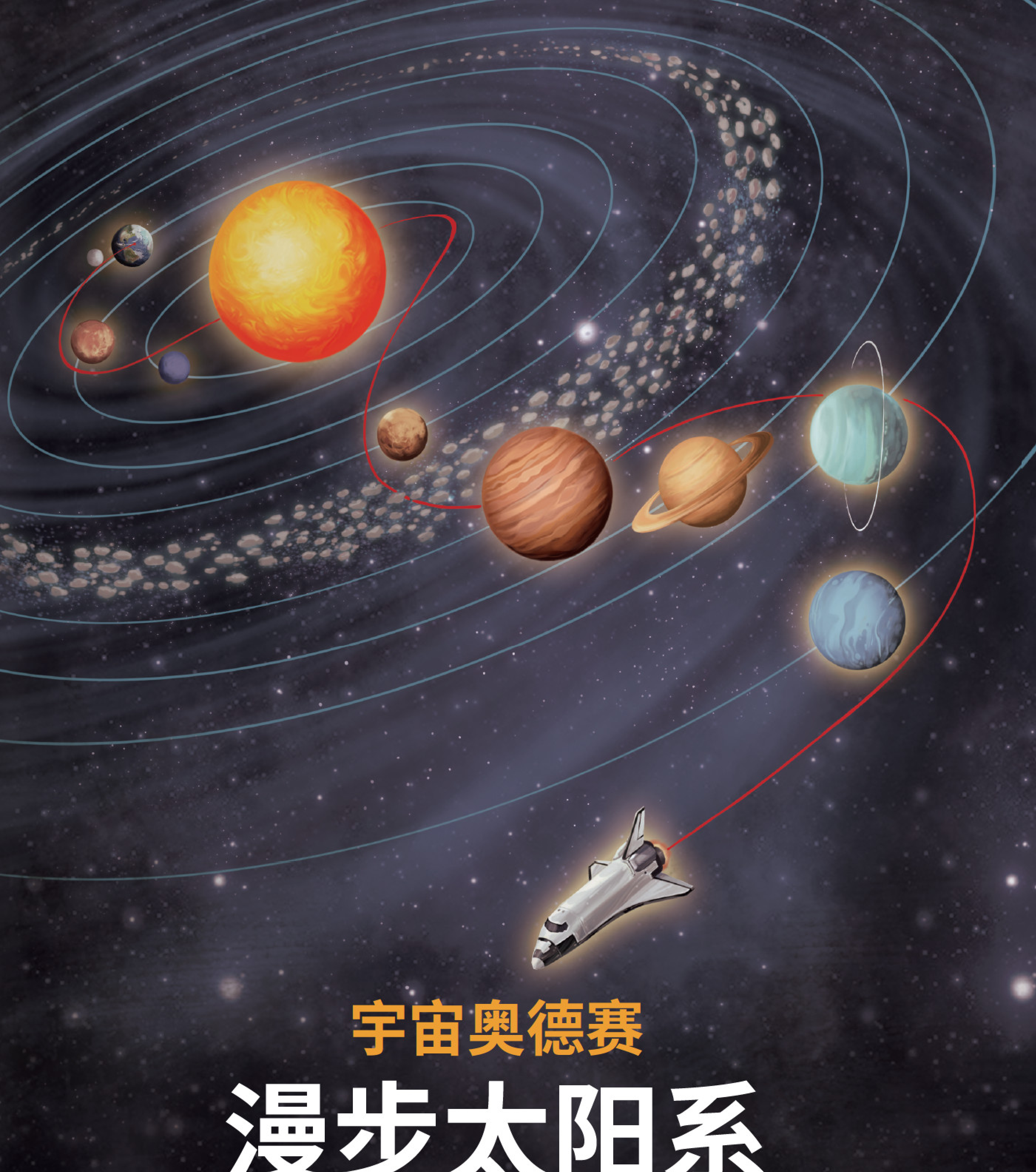


宇宙奥德赛

漫步太阳系

王爽——著

清华大学出版社



宇宙奥德赛

漫步太阳系

王爽——著

清华大学出版社
北京

图书在版编目（CIP）数据

宇宙奥德赛：漫步太阳系 / 王爽著. — 北京：清华大学出版社，2018（2018.10重印）
ISBN 978-7-302-50928-8

Ⅰ.①宇…　Ⅱ.①王…　Ⅲ.①天文学－普及读物　Ⅳ.①P1-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第187210号

责任编辑：胡洪涛　王　华
封面设计：于　芳
责任校对：王淑云
责任印制：杨　艳

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn, http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　邮　　编：100084
社 总 机：010-62770175　　邮　　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：北京亿浓世纪彩色印刷有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：165mm×235mm　印　　张：16.25　字　　数：264千字
版　　次：2018年10月第1版　印　　次：2018年10月第2次印刷
定　　价：55.00元

产品编号：079941-02

自 序

2017 年 8 月，我开始在新浪微博（ID 是“王爽 _ 宇宙奥德赛”）上写天文学科普文章。没有料到的是，这些文章居然大受欢迎；到 2018 年 8 月底，# 宇宙奥德赛 # 的话题阅读量就已经超过了 2.5 亿。

但也有不少读者跑来问我，为什么要取“宇宙奥德赛”这么奇怪的名字。让我来解释一下其中的缘由。

公元前 8 世纪，古希腊大诗人荷马写下了著名的《荷马史诗》。这部传奇巨著包括两部史诗，其中一部叫《奥德赛》，讲述的是古希腊英雄奥德修斯在海上漂泊 10 年，历尽千辛万苦最终成功返乡的故事。2000 多年来，《奥德赛》一直被视为西方文学的奠基之作。

后来出现了无数向《奥德赛》致敬的作品。比如说，爱尔兰著名作家詹姆斯・乔伊斯有一部代表作，叫《尤利西斯》，被评为 20 世纪百大英文小说之首。尤利西斯其实就是奥德修斯的拉丁文译名。此外，乔伊斯也透露过《尤利西斯》的各章标题，都与《奥德赛》中的人物或事件一一对应。

再举个例子。英国著名科幻小说家亚瑟・克拉克有一部代表作，叫《2001：太空漫游》，被视为整个科幻史上最伟大的作品之一。它的英文名是“*2001: A Space Odyssey*”，直译过来就是“2001: 太空奥德赛”。

为什么“奥德赛”这个名字，会有如此之大的魔力？在我看来，“奥德赛”其实象征着一场探索未知世界的旅行。一场真正意义上的奥德赛之旅，能让我们摆脱千篇一律、平淡无奇的日常生活，去游历一个五彩斑斓、让人目不暇接的美丽新世界。

我的最终目的，是陪你经历一场前所未有、遨游整个宇宙的奇妙旅行。我们将从地球出发，依次游历太阳系（即行星世界）、银河系（即恒星世界）和河外星系（即星系世界），一直飞到宇宙的尽头。然后，我们将从宇宙尽头、同时也

是宇宙创生之处返航，在时间长河中顺流而下，依次探寻宇宙起源、生命诞生和宇宙命运的神奇奥秘。在这场旅行的终点，我们就能直面人类最终极的三大问题：我是谁？我从哪里来？我将往何处去？

本书是这场宇宙奥德赛之旅的第一段行程：太阳系之旅。我们将游历太阳系的 12 个景点，依次是地球、月球、金星、水星、太阳、火星、小行星世界、木星、土星、天王星、海王星和太阳系边缘。要特别强调的是，我想让你了解的并不是与这些天体相关的零碎知识，而是它们在人类文明史上的坐标。

以第 5 个景点太阳为例。关于太阳，我精选了 4 个主题：①太阳光谱，人类认识太阳的第一种途径。②太阳能量来源，困扰人类数百年的超级难题。③太阳中微子，两度获得诺贝尔物理学奖的前沿课题。④太阳风暴，对地球最具威胁的太阳现象。相信这些精挑细选的主题，能让你对太阳在人类文明史上的坐标有一个比较全面的了解。

换句话说，本书为你呈现的并不是一些关于太阳系的碎片化知识，而是一个关于太阳系的完整知识体系。借由从上百个初选题目中精挑细选出来的 40 个主题，我希望能让读者了解：这些太阳系主要天体曾在人类文明史上扮演过什么重要角色？与哪些特别重大的科学事件有关？如何改变人类对整个宇宙的看法？又与我们的现实生活有着怎样的联系？

除了着眼全局的知识体系式的呈现方式，本书还有以下几个主要特点：①问题引导，每一节都在回答一个最关键的问题。②故事驱动，书中穿插了海量的关于科学家的逸闻趣事。③内容可视化，全书几乎没有数学公式，所有的知识点都会被转化成可视化的物理图像，然后用贴近生活的类比来加以解释。④总结常态化，为了方便读者理解，每一节的结尾都会对本节中最重要的内容进行总结。

此外，为了标记一些天文数字，本书采用科学计数法，也就是把一个数字表示成 $a\times10^n$ 的形式，其中 a 处于 1~10 之间，而 n 是一个整数。

为了写这本书，我不知看了多少学术论文、人物传记、科普书和科普纪录片。相信你很容易感受到书中倾注了多少心血和诚意。

准备好了吗？那我们就出发吧。

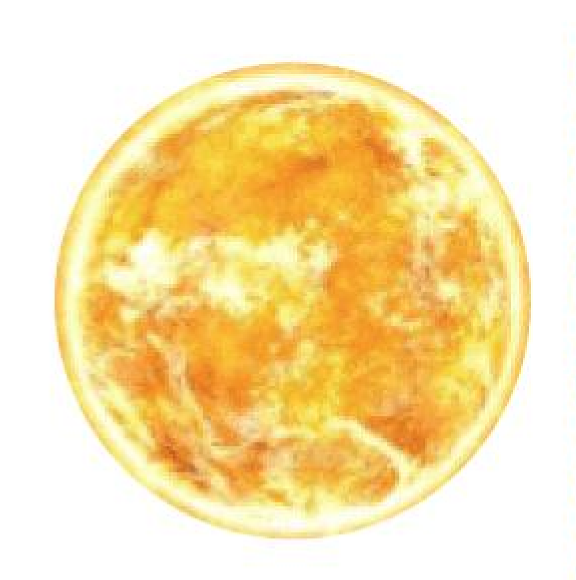
目 录



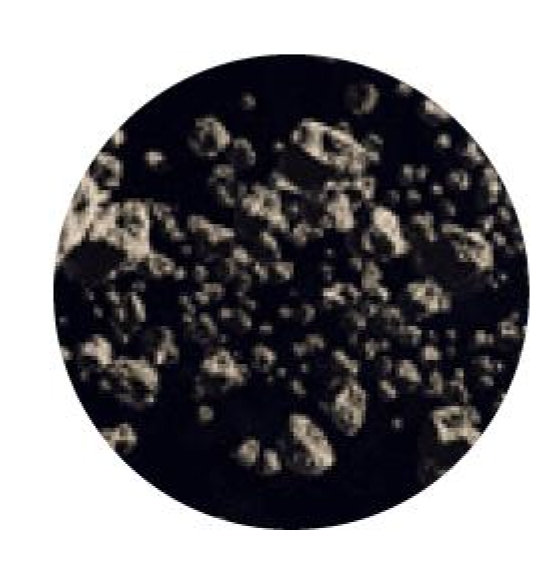






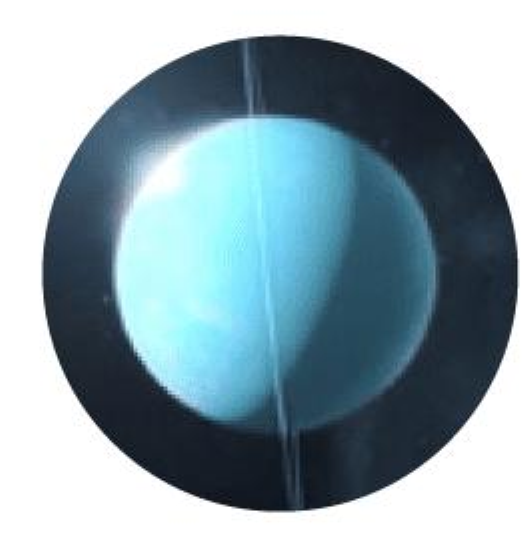
















01

地　球





1.1 人类如何确定地球的形状和大小？

这场漫游太阳系的旅程，始于一张尽人皆知的图片。它就是我们打开微信时看到的那张初始图片的背景图。这是一张相当有名的太空摄影照片，名叫“蓝色弹珠”，是由阿波罗 17 号的宇航员于 1972 年 12 月 7 日在太空中拍摄的。显然，图中的那个蓝白相间的大圆球，就是我们的家园——地球（图 1.1）。



图 1.1 蓝色弹珠

质量：5.972×10^{24} 千克

体积：1.083×10^{21} 立方米

与太阳的平均距离：1.496×10^{8} 千米

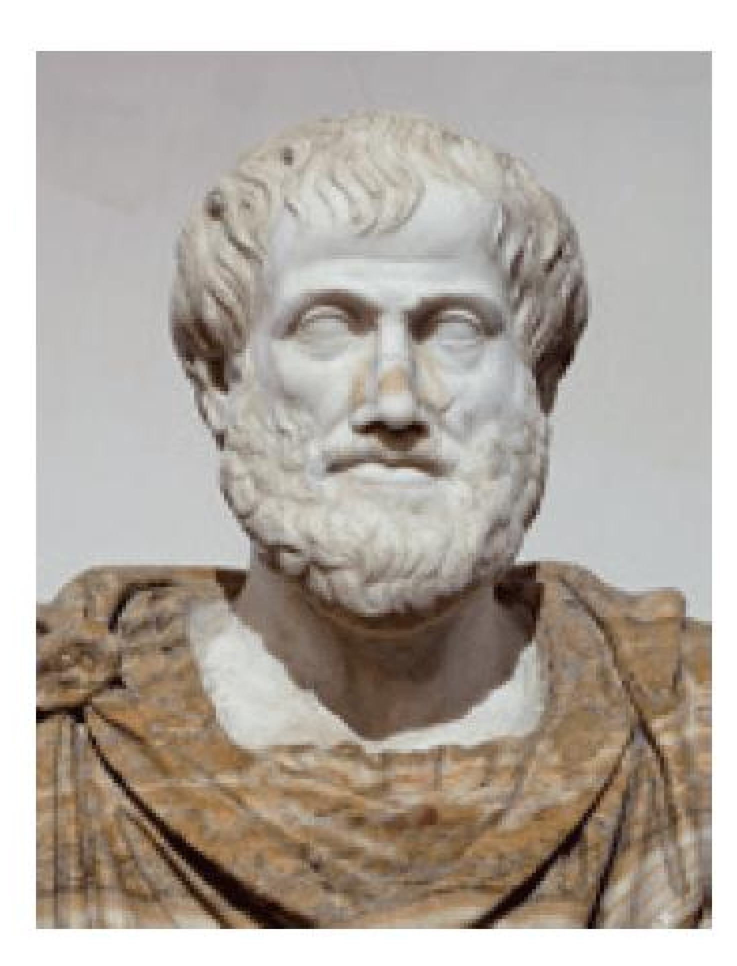


图 1.2 亚里士多德

在太空中，很容易看出我们的家园是球形的。不过在压根去不了太空的古代，人们最早是如何得知大地是球形的?

很多中小学教科书中都是这么说的：1519 年 9 月 20 日，航海家麦哲伦率领着一支船队，从西班牙的塞维利亚港扬帆起航；他们一直向西航行，花了近 3 年的时间，又返回了塞维利亚港，从而首次证明大地其实是球形的。

但我要告诉你，历史并非如此。早在麦哲伦环游地球的 1800 多年前，古希腊人就已经知道大地是一个大圆球了。世界上第一个科学论证出大地必然呈球形的人，是古希腊大哲学家亚里士多德（图 1.2）。

亚里士多德是历史上最博学的人，或许没有之一。

公元前 384 年，亚里士多德出生在古希腊北部的一个叫马其顿的小国。他爸爸是马其顿国王的宫廷御医，但在他很小的时候就去世了。17 岁那年，亚里士多德进入了雅典的柏拉图学院。在那里，他得到了古希腊著名哲学家柏拉图的赏识，并被后者称为“学院之灵”。

不过亚里士多德是一个很有主见的人，对柏拉图的学术观点并未全盘接受。有一次学院集会，亚里士多德甚至当着众人的面毫不客气地批驳了柏拉图的观点。有些人跳出来指责他不尊敬老师。没想到，亚里士多德直接回应了一句千古名言：“吾爱吾师，更爱真理。”

柏拉图去世后，亚里士多德离开他生活了 20 年的雅典，在马其顿找了一份教书的工作。他有个学生是一个矮个子的 13 岁男孩。过了没几年，全世界都将在这个男孩的脚下颤抖，因为他就是威名赫赫的亚历山大大帝。

此后的数年时间，亚里士多德一直陪伴在亚历山大的身边。除了向这个男孩传授科学文化知识，亚里士多德还致力于培养他征服世界的野心。事实上，他甚至教导亚力山大要成为“希腊人的领袖和野蛮人的暴君，把前者视为亲朋好友，而把后者视为飞禽走兽”。

8 年后，亚历山大继承了马其顿的王位，并且很快就征服了古希腊的所有

城邦。不久之后，亚里士多德作为国王的特使重返雅典，并在那里建立了自己的学院。

在雅典，亚里士多德很快就确立了在学术界泰斗的地位。基于自己的讲课笔记，他撰写了大量的学术著作；这些著作覆盖了当时人类所能涉及的一切领域，这也让亚里士多德成为世界上最博学的人。在其中一部名叫《论天》的著作中，亚里士多德第一次科学论证了为什么大地是一个圆球。

他是怎么发现这件事的呢？其实很简单。众所周知，在有太阳的日子里，我们总能在地面看到自己的影子。这是由于我们的身体挡住了太阳光，让它无法照射到我们身后地面的缘故。更重要的是，我们影子的形状和我们身体的形状差不多。换句话说，只要能知道一个物体影子的形状，就能大致推断出这个物体本身的形状。亚里士多德就想了，既然我们看不到整个大地的形状，那我们能不能看到大地影子的形状呢？答案是可以。只要发生了月全食，我们就能看到大地的影子。

图 1.3 就展示了其中的原理。如果地球运行到太阳和月球之间，就能挡住太阳光直接射向月球的路线。这样一来，地球的影子就会投射到月球之上。

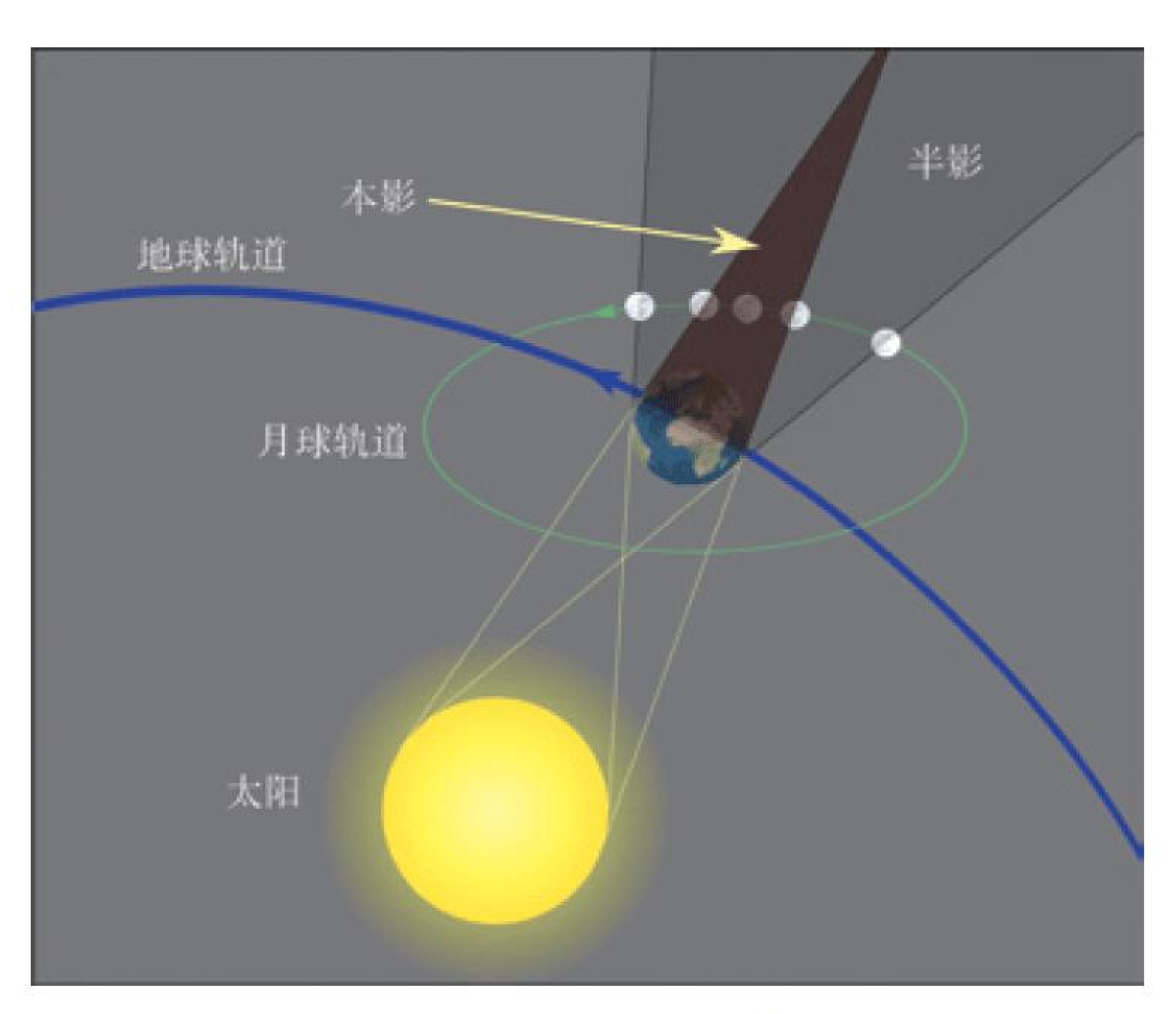


图 1.3　月食原理图

2018 年 1 月 31 日的晚上，就发生了一场中国绝大部分地区都能看到的月

全食。图 1.4 是一位网友用多台摄像机的素材拼合而成的。图中红色的圆球是月全食，而白色的圆球是月偏食。在这张图片的正中间可以看到一个黑色的圆形区域，那就是地球的影子。很明显，它是圆形的。



图 1.4 2018 年 1 月 31 日观测的月全食

在亚里士多德的时代，当然拍不出这么清晰的照片。但观察了数次月全食之后，亚里士多德还是发现了一件很有意思的事情：在发生月全食的时候，遮住月球的黑斑，其边缘总是呈圆弧形。据此，他推断出大地的影子应该是圆的；换言之，地球本身应该是球形的。

在接着游览地球之前，不妨说几句题外话。看了月全食的图片后，可能你会产生这样的疑问："在月全食期间，太阳光已经被地球挡住了，那就应该完全看不到月球。但实际上，我们会看到一个红色的月球。这是怎么回事呢？"

为了回答此问题，让我们先从正常情况下看到的月球说起。众所周知，月球本身是不发光的，只能反射太阳光。太阳光的频率覆盖了可见光的所有频率区间。

换句话说，无论是红橙黄绿青蓝紫，太阳光里都应有尽有。平时，这些不同频率的可见光，会经过月球的反射后射入我们的眼里；因为所有频率的可见光混合之后会变成白光，所以我们就会觉得月球发出的是白光。

那为什么在月全食期间，月球会变成红色的呢？奥秘在于地球的大气层。在日常生活中，我们经常能看到光的折射现象。它说的是，光从一种媒介进入另一种媒介以后，其运动方向会发生改变。比如说，光要是从空气中进入水中，其运动方向就会改变（图 1.5）。同样的道理，太阳光从真空中进入地球的大气层以后，也会发生折射。这样一来，原本照不到月球的太阳光，就会向地球阴影区域内发生偏折；等它照到月球上以后，又会反射到我们的眼睛里。这就解释了为什么在月全食的时候还能看到月球。

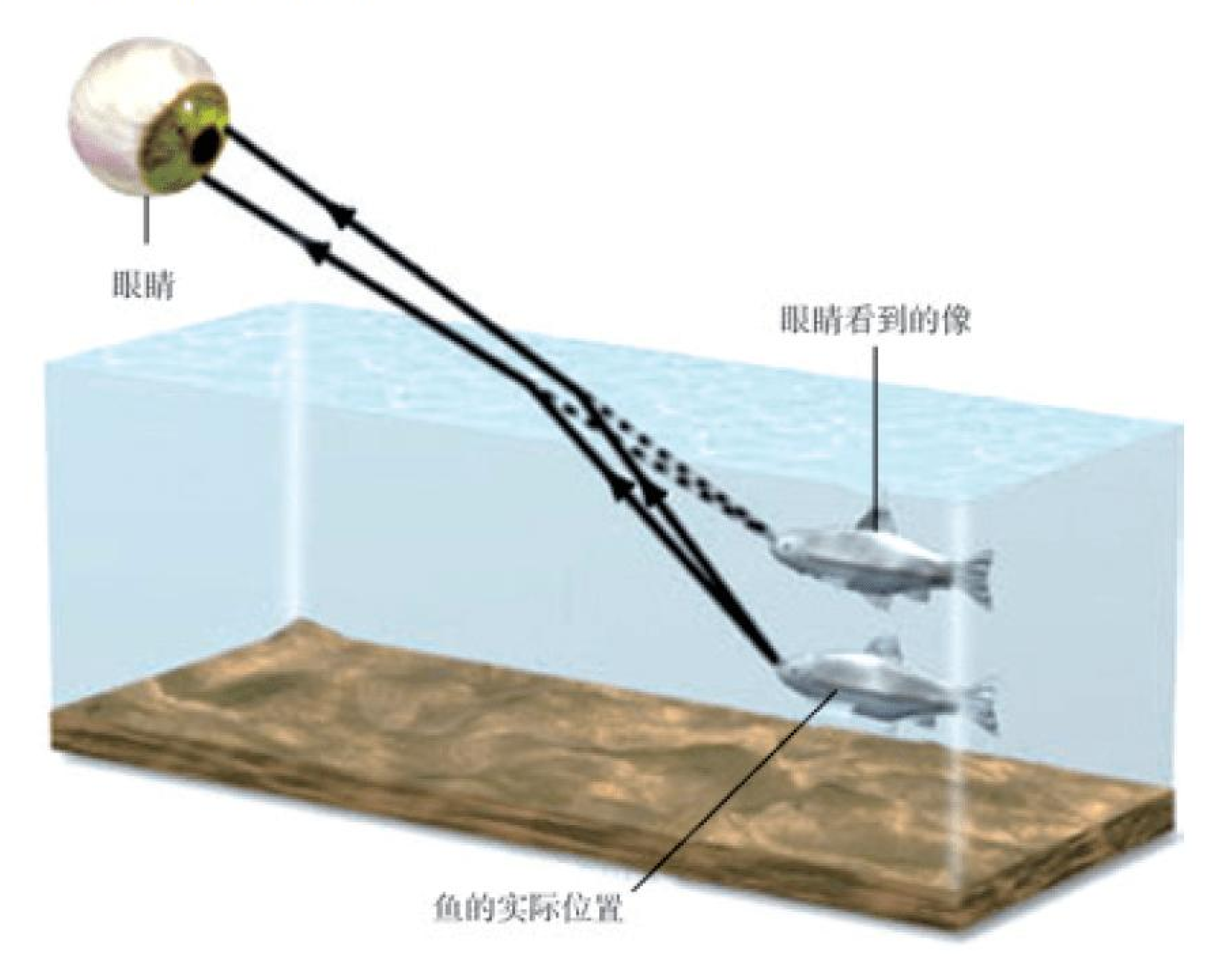


图 1.5　光的折射

除了能让太阳光发生折射，地球的大气层也能让太阳光发生散射。说得简单一点，地球的大气层会吸收部分太阳光，然后再把它们射向四面八方。很明显，被散射掉的太阳光就无法再照到月球上了。至于入射光是否会被散射，与它的波长密切相关：波长较短的蓝光，很容易就会被散射掉（这就是为什么我们看到的天空是蓝色的）；而波长较长的红光，则几乎不会受到影响。所以，当太阳光在

地球大气层中穿行的时候，波长较短的蓝光会被散射掉，只留下波长较长的红光。这些红光会向地球阴影区域发生偏折，被月球反射后又射入我们的眼里。这样一来，在月全食期间，我们自然就会看到红色的月球了。

说完了地球的形状，下面我们再来聊聊人类如何测出地球的大小。事实上，世界上第一个准确测出地球大小的人也是一个古希腊人，他就是著名哲学家埃拉托色尼（图 1.6）。

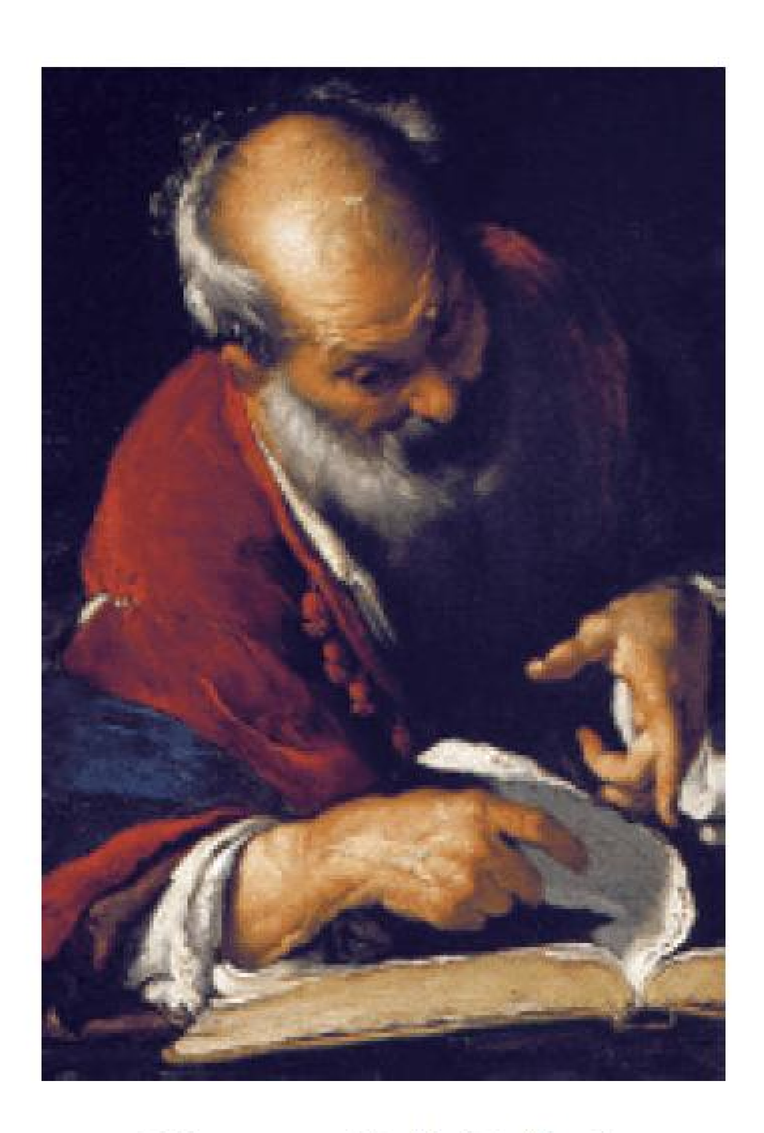


图 1.6 埃拉托色尼

与亚里士多德一样，埃拉托色尼也是一个全才，在包括数学、物理、天文、诗歌、戏剧在内的诸多领域都作出了举足轻重的贡献。更重要的是，他最早提出了地理学这个名词，与大家熟知的经度、纬度的概念，因而被后世称为“地理学之父”。

这样的顶级大牛，人生之路肯定顺风顺水吧？错了。在雅典求学的时候，埃拉托色尼一直被别人戏称为“千年老二”。不过这个绰号一点也没有冤枉他。因为那个始终胜他一筹的人，就是被后世称为“力学之父”的阿基米德。

眼看自己超不过阿基米德，埃拉托色尼选择远走他乡，去埃及做了亚历山大图书馆的馆长。在那里，他终于找到了自己的用武之地。

埃拉托色尼上任之初，世界上藏书最多的图书馆还在古希腊。当然，在那个尚未发明印刷术的年代，所有的书都是手稿。在埃及法老的支持下，埃拉托色尼向古希腊的那些大图书馆付了很多钱，把它的藏书都借到埃及，好让自己的馆员抄写副本。这些副本临摹得特别好，完全达到以假乱真的程度。所以还书的时候，埃拉托色尼就特别奸诈地只还了那些书的副本，而把真品都留在了自己的图书馆里。靠着这样的手段，亚历山大图书馆很快成了当时全世界最大的图书馆。

在管理图书馆之余，埃拉托色尼也会利用图书馆的资源进行学术研究。他一生中最有名的研究工作，就是测出了地球的周长。

公元前 2 世纪的埃及南部，有一个叫赛伊尼的城市；它今天叫阿斯旺，是著名的阿斯旺大坝的所在地。在赛伊尼，有一口很有名的深井；在夏至日的正午时

分，太阳光恰好可以直射井底。这意味着，此时此刻太阳正好处于赛伊尼的正上方；换言之，太阳与地球球心的连线恰好与这口井的井口垂直（用今天的眼光来看，之所以会有这样的现象，是因为西恩纳位于北回归线的缘故）。这个现象很有名，每年夏至日都能吸引不少的游客。而埃拉托色尼发现，还可以用它来测量地球的周长。

听起来似乎很玄幻，是吧？其实只要用一点最简单的几何学知识，就可以把它说清楚。

图 1.7 就是埃拉托色尼测量地球周长的原理图。此图展示了夏至日的正午时分，太阳光照射埃及的情况。

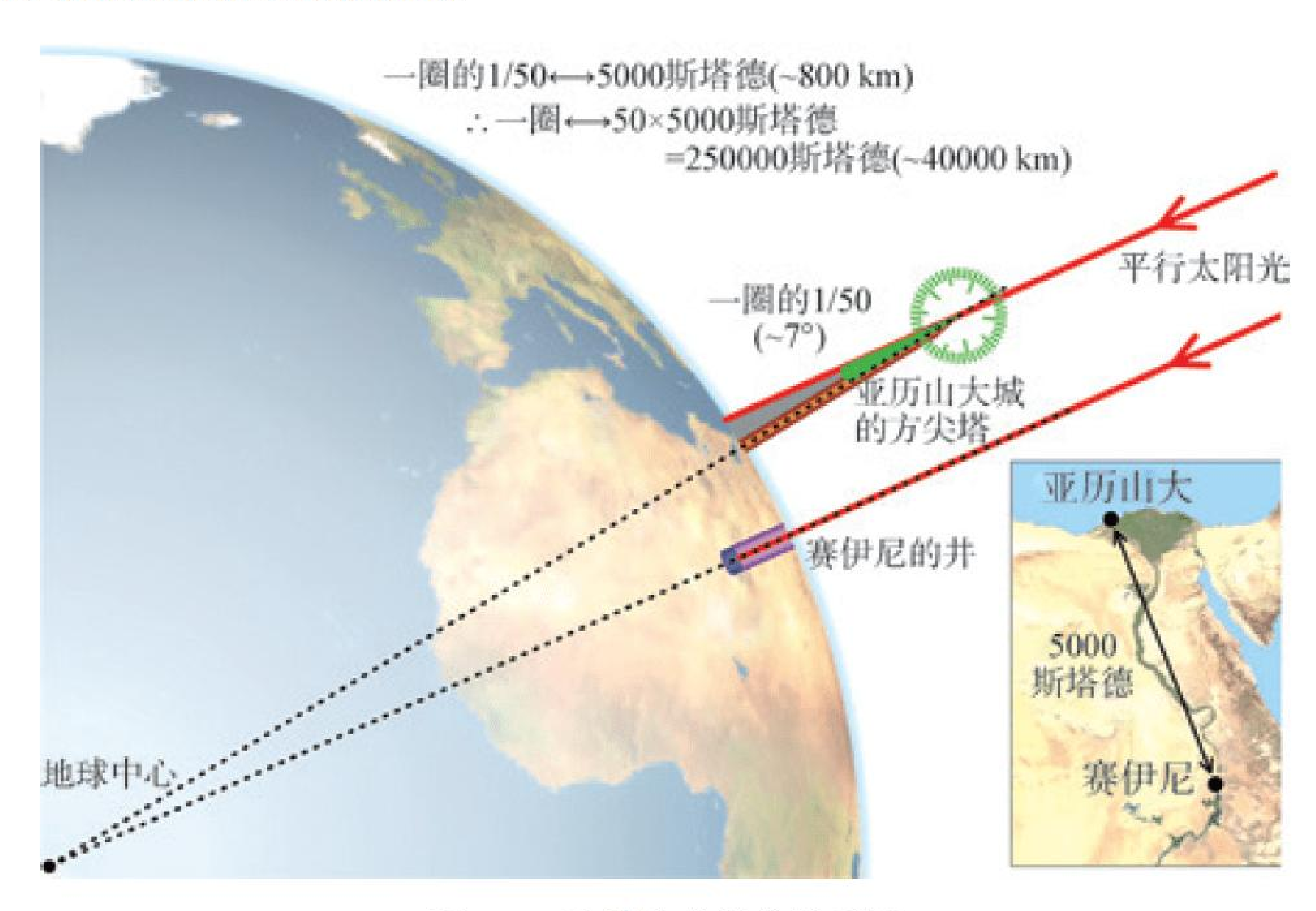


图 1.7　测量地球周长原理图

图中的紫色圆柱就是赛伊尼的那口深井。前面说过，在夏至日的正午时分，红色平行线所代表的太阳光可以直射到这口深井的井底。这意味着，这束直射井底的太阳光可以穿过地球的球心。与此同时，埃拉托色尼在亚历山大城测量一个很高的方尖塔（即橙色长条）的阴影长度，并以此算出这个方尖塔与太阳光之间的夹角（即绿色夹角）约为 7.2 度。运用简单的初中几何知识，可以知道此夹角恰好等于赛伊尼与亚历山大市之间的那段圆弧相对于地球球心的角度。因为环绕

地球一圈的圆弧的角度是 360 度，所以这两座城市之间的距离约为地球总周长的 1/50。

然后，埃拉托色尼派出了一个埃及商队，用尺子一点点地量出赛伊尼和亚历山大城之间的距离，结果大概是 5000 斯塔德。这样一来，埃拉托色尼就测出了地球的周长，约为 25 万斯塔德。

古埃及人的 1 斯塔德，相当于现代人的 157 米。所以埃拉托色尼的测量结果，换算成今天的长度单位，就是 39 250 千米。不妨拿它和今天的结果做一下对比。根据地球卫星的测量结果，地球的周长是 40 076 千米。换言之，2200 多年前埃拉托色尼用尺子测出的地球周长，与今天科学家用卫星测出的结果，只有区区 2% 的误差。

我们来做个总结。早在 2300 多年前，亚里士多德就通过对月全食的观察，发现了地球的影子是圆形的，进而推测出地球本身是球形的。而在 2200 多年前，埃拉托色尼则利用尺子和一点基本的几何学知识，测出了地球的周长是 39 250 千米，这与今天用地球卫星测出的结果只有 2% 的误差。显然，即使在什么观测条件都没有的古代，人类依然可以靠智慧创造出令人难以置信的奇迹。

前面我已经介绍了人类如何确定地球的形状和大小。下一节要讲一个在科学史上更有影响力的问题，即人类如何测出地球的质量。

1.2 人类如何测量地球的质量?

地球质量的测量，在科学史上具有举足轻重的地位。为了讲清楚此事的来龙去脉，让我先从一次著名的打赌事件说起。

1683 年的一天，三位英国皇家学会的院士在伦敦聚会，然后约在一起吃晚饭。这三人分别是埃德蒙多·哈雷、罗伯特·胡克和克里斯托弗·雷恩。

前两人的名字可能会让你觉得颇为耳熟。埃德蒙多·哈雷就是哈雷彗星的那个哈雷，而罗伯特·胡克则是胡克定律的那个胡克。这两人都是科学史上的巨人，其科学成就远远不止于此。在后面的旅程中，我会详细地介绍他们的科学贡献。

而名气较小的克里斯托弗·雷恩，早年是牛津大学的天文学教授。但在 1666 年，伦敦发生了一场大火，把整个伦敦城区都付之一炬。在英国国王的任命下，雷恩主持了灾后重建的工作；从那以后，他就转行当了一名建筑师。英国有很多有名的建筑，例如圣保罗大教堂、格林尼治天文台和剑桥图书馆，都是雷恩的作品。虽然雷恩后来已经不怎么做天文学方面的研究了，作为英国皇家学会的元老，他还是于 1680 年当选为英国皇家学会的会长。

晚饭期间，三位院士聊到了太阳系天体的运动。早在 17 世纪初，大天文学家开普勒就已经发现太阳系的各大行星都在沿椭圆轨道绕太阳旋转。但大半个世纪过去了，一直没人能解释为什么它们的运动轨道会是椭圆形的。雷恩就在这个饭局上发起一个赌约：要是有人能解释行星为何会沿椭圆轨道运动，他就奖励那人 40 先令，这相当于当时一个大学教授半个月的薪水。

顺便说一句。以今天的眼光来看，这完全是个搞笑性质的赌约。要别人解决全世界最大的科学难题，所给的奖励竟只有一个大学教授半个月的薪水。

胡克是个吹牛大王，当场表示他已经解决了这个问题。不过，他不愿意立刻公布这个问题的答案。他的理由是，要是太早公布答案，就会剥夺别人寻找答案的乐趣。当然，这次晚饭之后，胡克就把要公布答案的事给“忘了”。

但哈雷对这个问题着了迷。他不相信胡克能找到问题的答案，但他知道这世

上确实有一个人，有能力破解其中的奥秘。所以在1684年8月的一天，哈雷专程前往剑桥大学，去拜访这个神龙见首不见尾的绝世高人。想必你已经猜到了，这个注定要改变历史进程的高人，就是大名鼎鼎的艾萨克·牛顿（图1.8）。

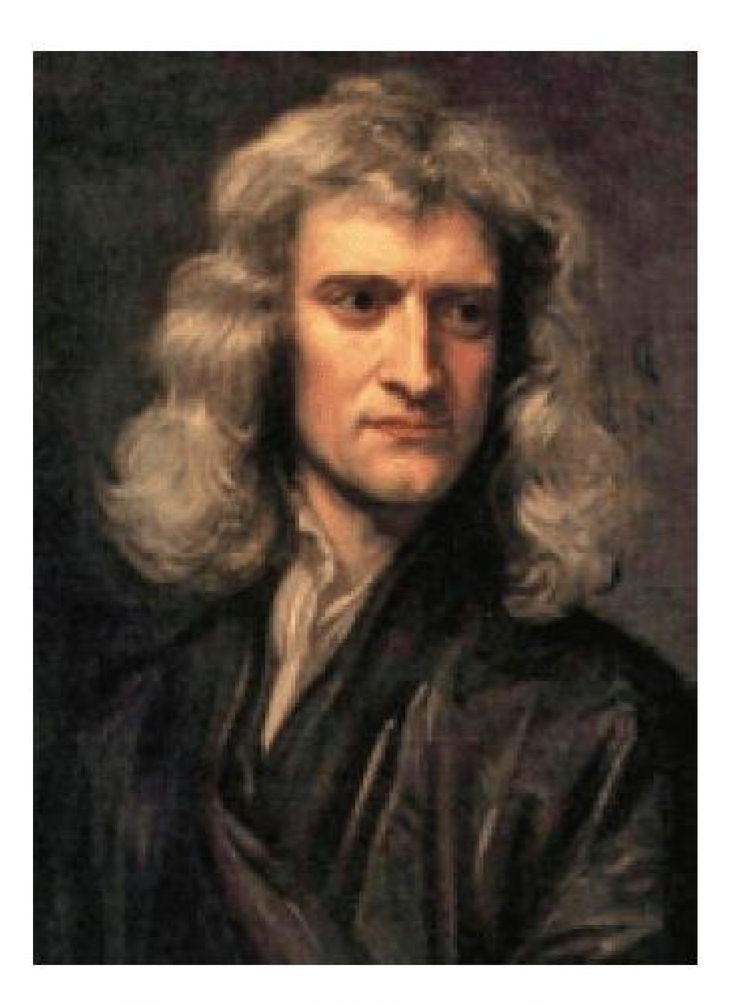


图1.8 艾萨克·牛顿

牛顿是有史以来最伟大的两位科学家之一。他是世界上第二个被册封为爵士的科学家（第一个是弗朗西斯·培根），也是世界上第一个享受国葬待遇的科学家。法国启蒙思想家伏尔泰目睹了牛顿的葬礼，并在回忆录中写道：“英国人悼念牛顿就像悼念一位国王。”后世对牛顿有数不清的赞美。其中流传最广的是英国诗人亚历山大·蒲柏的一首诗：Nature and nature's laws lay hid in night; God said “Let Newton be” and all was light.（道法自然，旧藏玄冥；天生牛顿，万物生明。）

世界上有很多惊天动地的大事，都源于一些相当不起眼的小事。牛顿之所以能获得如此的盛名，很大程度上就源于哈雷的这次拜访。

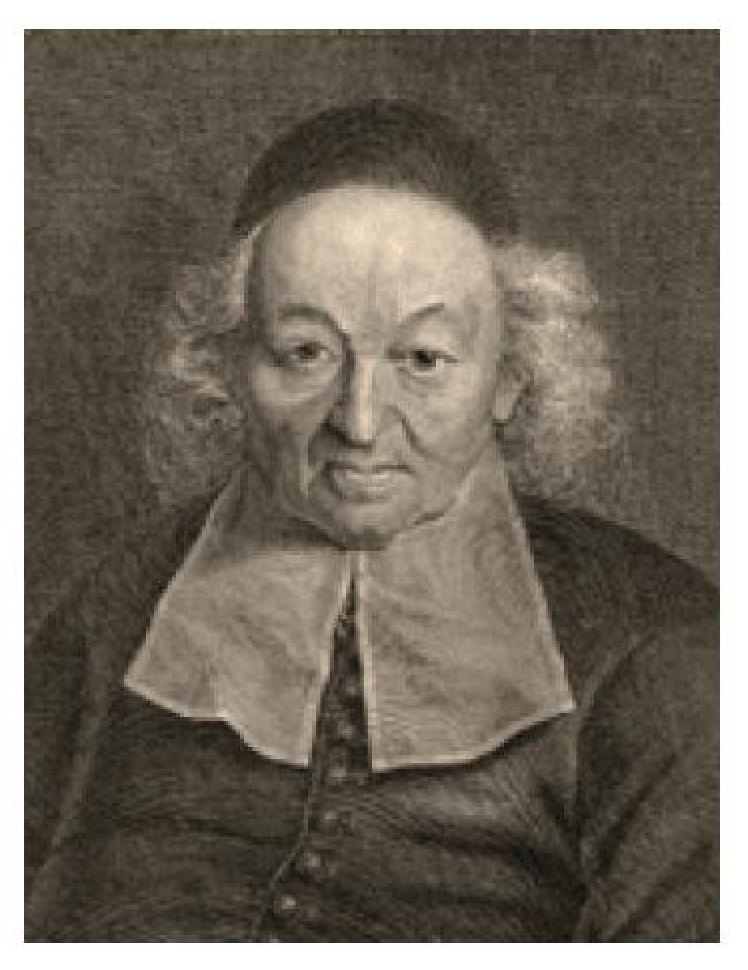
在继续讲故事之前，让我们先来简单地回顾一下17世纪人们对引力的研究。现在我们已经知道，任意的两个物体间都存在引力，且引力的大小与这两个物体的质量成正比，而与它们距离的平方成反比，这就是引力的平方反比律。

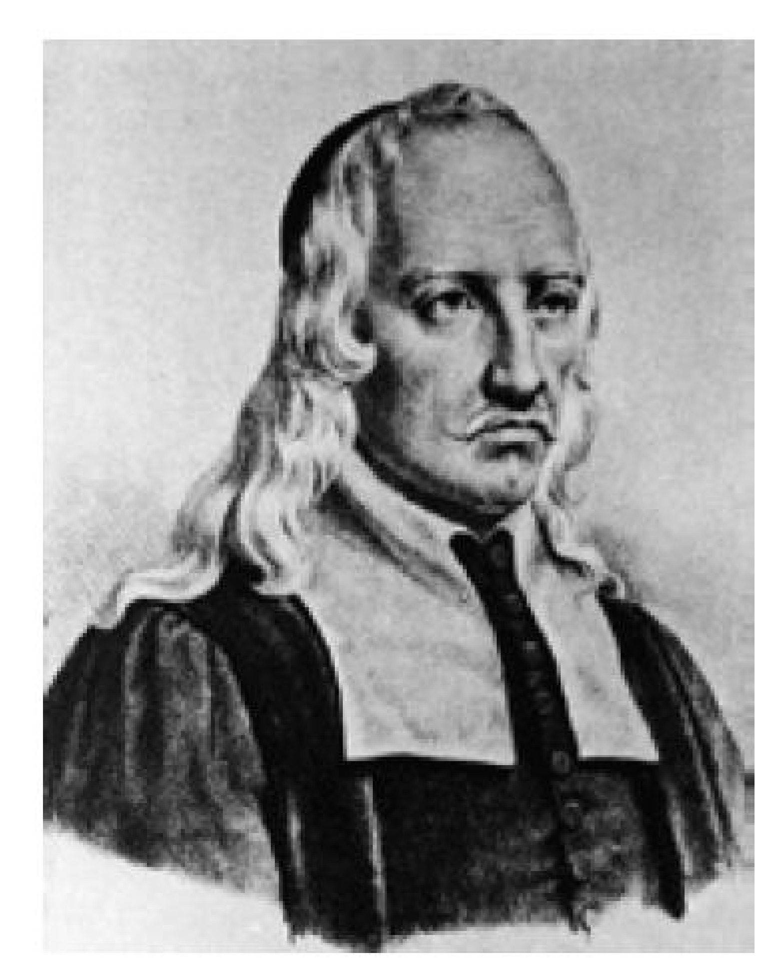
现在很多教科书都说，引力的平方反比律是牛顿提出的。事实上，这种说法是错的。早在1645年，也就是牛顿出生后的第3年，法国天文学家布利奥（图1.9）就提出了这个平方反比律。不过布利奥犯了一个很大的错误：他误以为两个物体之间有时存在引力，有时又存在斥力。

随后，意大利物理学家博雷利（图1.10）也在自己的书中猜测，太阳系的所有行星都受到了太阳的引力，且太阳的引力满足平方反比律。

到了17世纪70年代，胡克也开始大力宣扬平方反比律；他甚至在一封私人通信中，向牛顿大力宣扬了这个理论。但类似于布利奥和博雷利，胡克同样无法证明平方反比律的正确性。

为什么胡克等人都无法证明平方反比律是正确的呢？答案其实很简单。前面说过，早在17世纪初，开普勒就提出了著名的开普勒三定律，揭示了太阳系的


图 1.9　布利奥


图 1.10　博雷利

各大行星都在沿椭圆轨道绕太阳旋转。要想证明引力的平方反比律，就得证明受到这种引力的行星，其运动轨道一定是一个椭圆。换句话说，就是要从平方反比律出发，最后推导出开普勒三定律（图 1.11）。但问题在于，要想达到这个目的，就必须使用当时还不存在的一种数学工具，那就是微积分。

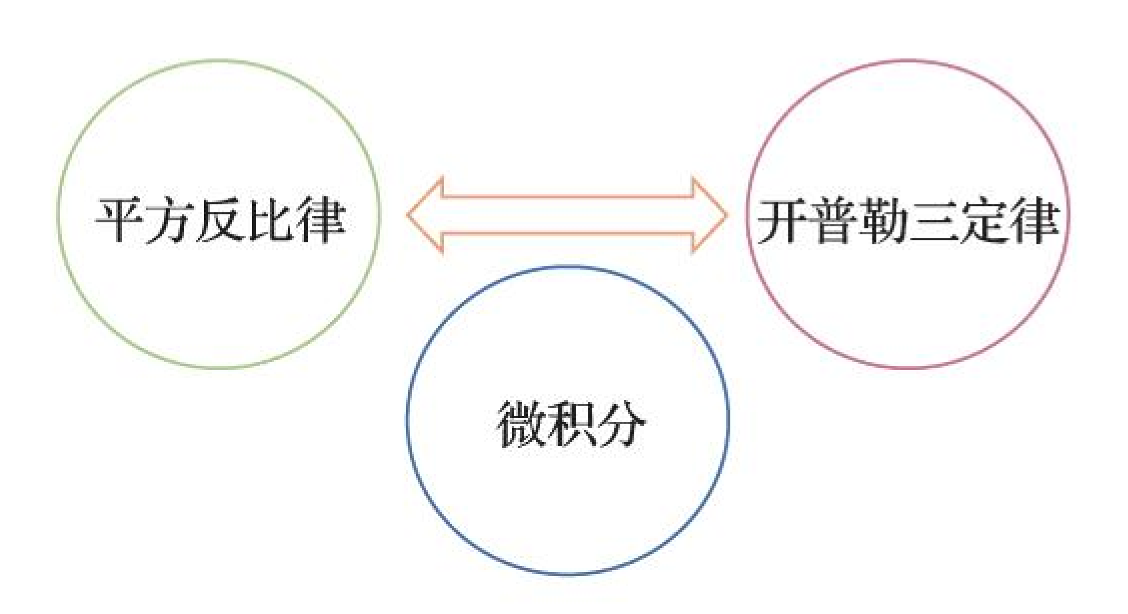


图 1.11　科学史上最有名的难题

说到这里，你就能明白牛顿的特殊之处了。作为微积分的发明者，牛顿是当时全世界唯一一个有能力破解这个超级世纪难题的“天选之人”。

但牛顿有一个怪癖：他不喜欢发表自己的研究成果。因此，尽管他早已破解了这个科学史上大名鼎鼎的世纪难题，却一直秘而不宣。要是没有意外，它很可能会被当成一个秘密，被牛顿带进坟墓。

因此，1684 年 8 月的这次哈雷和牛顿的会面，就成了一个真正意义上的历史转折点。整个人类科学史，甚至是整个人类文明史，就此改写。

寒暄了几句后，哈雷就开门见山地问牛顿：“如果太阳与其他行星间的引力满足平方反比律，那么这些行星的运动轨道将会是什么样的？”

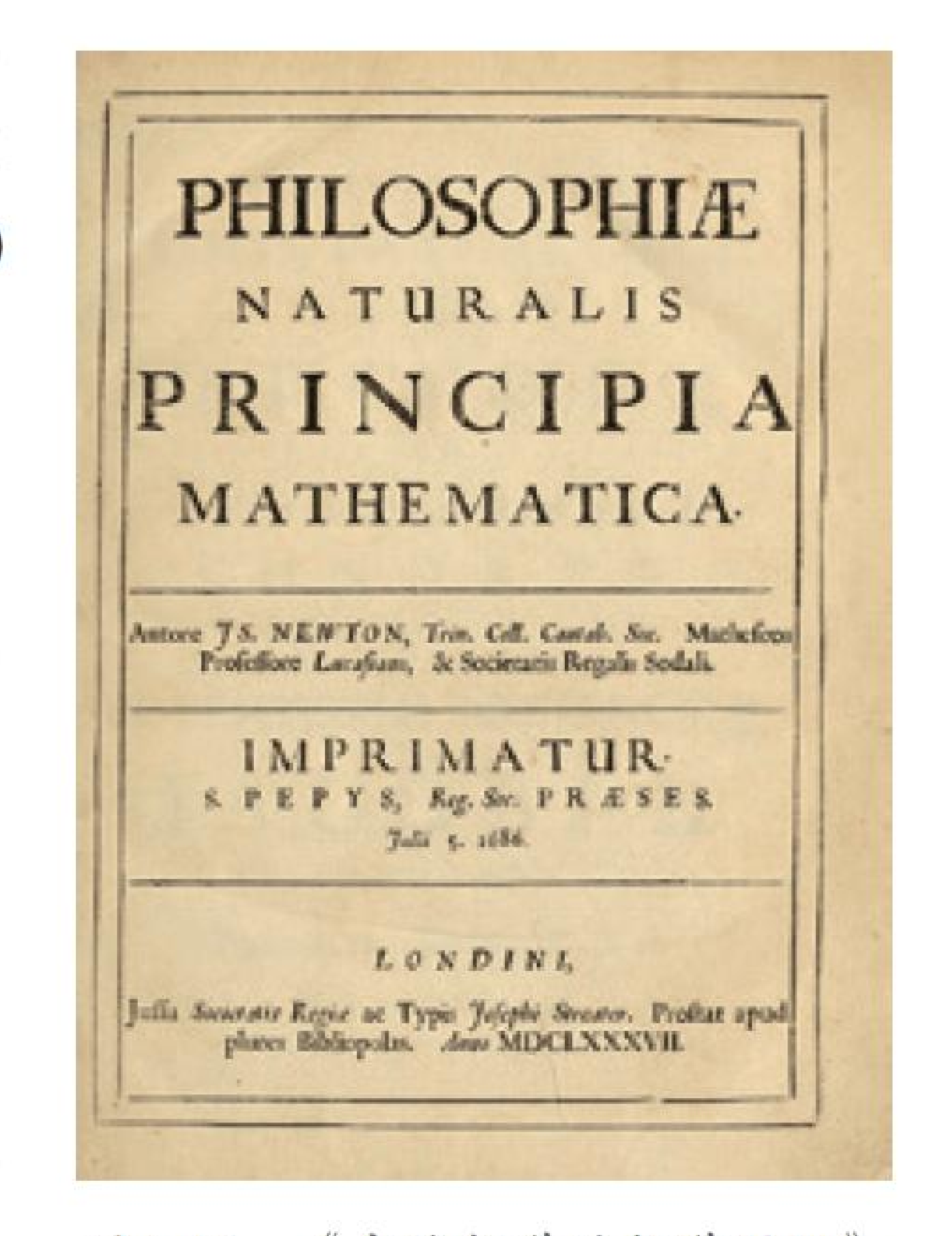
牛顿不假思索地回答道:“当然是个椭圆。”

哈雷大为惊讶，马上追问:“你是怎么知道的？”

牛顿泰然自若地回答道:“我早就算过了。”

激动不已的哈雷，马上要求看牛顿的计算过程。而牛顿在故纸堆里翻了半天，什么也没有找着。不过，他答应哈雷，会重新计算一遍，并把它写成一篇论文。

两年后，牛顿兑现了自己的诺言。事实上，他所做的比他承诺的要多得多。他交给哈雷的不是一篇论文，而是一本书，那就是《自然哲学的数学原理》(图 1.12)。在这部有史以来最伟大的学术著作 (没有之一) 中，牛顿基于欧几里得开创的公理化体系，提出了牛顿力学三定律和万有引力定律，从而完成了物理学史上的第一次革命。



PHILOSOPHIÆ

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.

S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.

Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

图 1.12 《自然哲学的数学原理》

这本书让哈雷佩服得五体投地。此后他逢人便说，牛顿是这个世界上最接近神的人。持类似观点的人还有后来与牛顿争夺微积分发明权的大数学家莱布尼茨。他曾说过，牛顿在科学上的贡献超过以前所有人的总和。

事实上，哈雷对人类文明最大的贡献就是促成了《自然哲学的数学原理》这本书的出版。英国皇家学会本来已经同意出版这本书，但没过多久又变卦了。这是因为皇家学会刚刚在一本叫《鱼类志》的书上赔了很多钱，怕在一本极度晦涩难懂的书上继续赔钱。所以哈雷干脆自掏腰包，垫付了这本书的全部出版费用。1687 年，这部划时代的科学巨著正式出版。这让牛顿立刻名满天下，从而直接登上了科学的神坛。

一次饭局上的打赌，最后竟然促成了有史以来最伟大的学术著作的出版。这应该算是蝴蝶效应的最佳例证了。

顺便说件比较搞笑的事情。皇家学会由于在《鱼类志》上赔钱太多，无力支付哈雷为学会当秘书的工资，所以就把一些卖不出去的《鱼类志》寄给他当薪水。

言归正传。知道了万有引力的概念以后，我们就可以讲讲该如何测量地球的

质量了。

众所周知，地球上的所有物体都会受到重力的作用，而这个重力源于整个地球对它的万有引力。这可以用一个非常简单的公式来描述：

$$\frac{GMm}{R^2} = mg$$

这个公式的左边是物体受到的万有引力，右边则是它受到的重力。其中的 m 是物体的质量，化简时可以消掉；g 是重力加速度，约等于 9.8 米 / 秒 ^{2}；R 是地球的半径，约等于 6400 千米（上一节已经讲过如何测量地球的周长，由此可以推算出地球的半径）。这样一来，不知道的物理量就只剩两个：牛顿引力常数 G 和地球质量 M。换言之，只要能用别的办法测出牛顿引力常数，就可以算出地球的质量。

而世界上第一个测出地球质量的人，是英国物理学家亨利·卡文迪许（图 1.13）。



图 1.13　亨利·卡文迪许

卡文迪许有两个非常鲜明的特点。第一，他完全不追求任何名利，不管做什么事都是从个人兴趣出发。这倒不奇怪，因为他本身就是全英国最富有的大贵族之一，根本用不着再去追求什么名利了。

第二，他患有非常严重的社交恐惧症。严重到什么地步呢？他不愿意与任何人见面，就连他的管家也只能通过书信的方式来和他交流。卡文迪许只参加一个社交活动，那就是在博物学家班克斯家里举行的每周一次的科学界聚会。但所有想和他交流的人，都必须使用对待“隐形人”的交流方式。也就是说，你得漫不经心地晃悠到他的附近，在不看他的情况下，对他身边的空气讲话。要不然，卡文迪许就会尖叫一声，然后逃到没人的地方。

这两个特点导致了一个非常诡异的后果：卡文迪许一生中做出了一大堆相当重要的科研成果，但只是把它们写进手稿，而没有写成论文发表。在不愿发表论文这件事上，他比牛顿还要极端。结果这些科研成果后来又被其他人重新发现，然后被冠以那些人的名字。比如说，大家在中学物理课本上学过的库仑定律、欧

姆定律和道尔顿定律，其实都是卡文迪许最早发现的。

当然，凡事总有例外。卡文迪许一生中做过的最有名的科学实验，也就是对引力常数 G 的精确测量，最初的创意却不属于他，而属于一个名叫约翰・米歇尔的牧师。

由于米歇尔没有留下任何画像，没人知道他具体长什么样；只有一些文字记载告诉我们，他是一个身材矮小、皮肤黝黑的胖子。但这个其貌不扬的人，却有一段不平凡的过往。他曾在剑桥大学皇后学院任教多年，还曾当上了这个学院的学监。但由于一些意外的变故，他不得不辞去剑桥大学的职位，跑到外地去做了一个教堂的主管。

米歇尔最早提出，有可能存在一种质量特别大的恒星，其引力强到就连光也无法从它的周围逃逸。这样一来，人们就永远看不到它。米歇尔把这种看不见的恒星称为“黑星”。这就是著名的“黑洞”概念的起源。

他也自己做了一套实验装置，想要用它测量引力常数 G 的大小。可惜的是，米歇尔还没来得及做这个实验，就因病去世了。这套装置几经辗转，就到了卡文迪许的手里。1797 年，卡文迪许对它进行了改进，然后用它完成了著名的卡文迪许扭秤实验。

图 1.14 就是卡文迪许扭秤实验的原理图。可以看到，此装置有一个倒 T 形的轻杆，它下面的两端连着两个质量相同、均为 m 的小球，而从中间伸出去的那端则连着一个小平面镜。把这套装置悬挂起来，然后用一束光去照那个平面镜；这束光会被平面镜反射，然后打到旁边的一把尺子上。

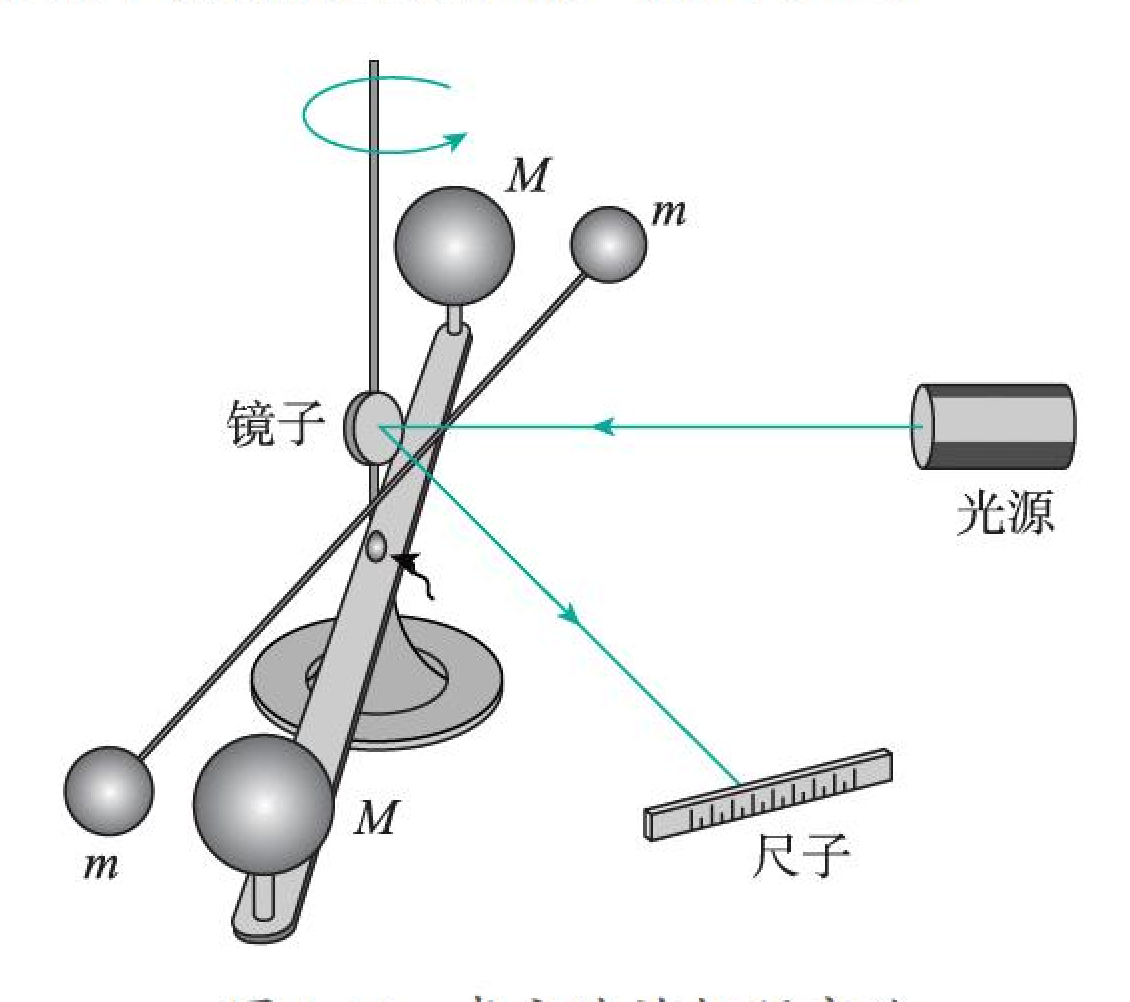


图 1.14　卡文迪许扭秤实验

接下来，在这两个小球的旁边，再放置两个质量一样、均为 M 的大球。由于大球的引力，悬挂着的倒 T 形杆会发生一个微小的偏转。这样一来，入射光与平面镜之间的夹角会发生一个微小的改变，从而使光线打到尺子上的位置发生一定的偏移。通过测量这个位置的偏移，就可以计算出大球与小球之间的引力大小，进而测出牛顿引力常数 G。

这个实验的精妙之处在于，它把非常难测的引力大小，转化成了容易测的位置变化，从而让牛顿引力常数的精确测量成为可能。

利用这套装置，卡文迪许测得的牛顿引力常数是 6.754×10^{-11} 牛・米 ^{2}・千克 $^{-2}$。而今天，最新的引力常数测量值是 6.674×10^{-11} 牛·米 ^{2}·千克 $^{-2}$。换言之，卡文迪许在 200 多年前测出的结果，与目前最新的结果相比，只有区区 1% 的误差。

用这个牛顿引力常数的测量值，可以算出地球的质量大概是 6×10^{24} 千克。

我们来做个总结。由于一场饭局上的赌局，哈雷于 1684 年 8 月来到剑桥大学，拜访了离群索居的牛顿。此次拜访就像第一张倒下的多米诺骨牌，最终促成有史以来最伟大的学术著作，即《自然哲学的数学原理》，在 1687 年正式出版。在这本巨著中，牛顿提出了万有引力定律，从而为测量地球的质量带来了曙光。1797 年，卡文迪许通过扭秤实验，相当精确地测出了牛顿引力常数的大小，进而算出地球的质量大概是 6×10^{24} 千克。

早在 18 世纪末，人类就已经测出了地球的质量。你可能会觉得，那么下一个课题，也就是地球年龄的测定，应该就不是什么难事了吧？大错特错。事实上，一直要等到 1955 年，也就是人类发明计算机和原子弹的 10 年后，才有人准确地测出了地球的年龄。



人类如何测出地球的年龄?

关于地球年龄的测量，让我们从一个著名物理学家被打脸的故事说起。

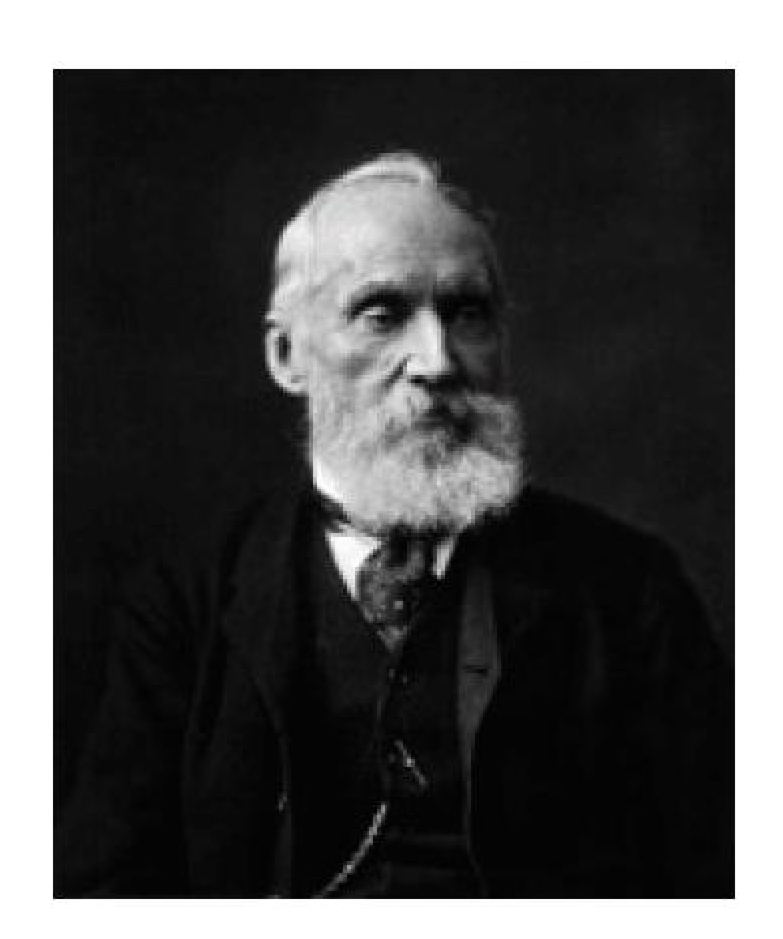


图 1.15 开尔文勋爵

在所有的自然科学中，最“硬”、最能揭示世界本质的，无疑是物理学。换言之，如果物理学家与其他学科的科学家就某个科学问题发生争执，一般都是物理学家笑到最后。但凡事总有例外。物理学家也曾被其他学科的科学家狠狠地打过脸。其中最典型的被狠狠打脸的例子，就是英国著名物理学家开尔文勋爵(图 1.15)。

开尔文勋爵原名威廉·汤姆森，1824 年出生在英国一个知识分子的家庭。他是一个神童，10 岁就考上了格拉斯哥大学，22 岁就当上格拉斯哥大学的教授。终其一生，他发表了 660 多篇科学论文。更重要的是，他是热力学的开创者之一，对热力学第一定律和第二定律的建立作出了重大的贡献；此外，他还发明了后来以他自己名字命名的绝对温标。这让他成为 19 世纪最有名的物理学家之一。

除了在学术界享有盛名，汤姆森也是一个非常成功的企业家。他成立了一家公司，专门生产和销售自己发明的一种航海罗盘；很快地，这家公司就成为英国海军最大的供应商，让他赚了很多钱。此外，他还成立了一家电力公司；所以他的家，就成为整个格拉斯哥市第一栋装上电灯的房子。更有影响力的是，他领导着一家公司，成功地铺设了第一条跨越大西洋的海底电缆。

由于在学术界和工业界的杰出贡献，1892 年威廉·汤姆森被英国皇室册封为第一代开尔文男爵（“开尔文”原本是一条流经格拉斯哥大学的河流的名字）。不过，人们更习惯称他开尔文勋爵。

当然，金无足赤，人无完人。开尔文勋爵也曾摆过两次乌龙。最有名的一次

乌龙发生在世纪之交的 1900 年。在那年的一次演讲中，开尔文勋爵公然宣称物理学的大厦已经建成，剩下的只是一些修修补补的简单工作。虽然他提到在物理学的天空上还飘浮着两朵乌云，但是他认为那只是两个用不了多久就能彻底解决的小问题。事实证明他大错特错。在 20 世纪初，那两朵乌云变成了两座全新的物理学大厦，即相对论和量子力学。这件糗事甚至被写进了不少国家的初中课本，让开尔文勋爵至今还受世人的嘲笑。

开尔文勋爵摆过的另一次乌龙就是他对地球年龄的错误估算。他是用热力学的方法估算地球年龄的：假设地球最初是一个巨大的火球，随着时间的推移，这个火球就由外向内逐渐冷却，从而变成今天的样子；而这个冷却的时间，就是地球的年龄。1862 年，他发表了一篇论文，宣称地球的年龄在 2 亿年到 4 亿年之间。而到了 1897 年，他又发表了一篇论文，宣称地球年龄其实是 2400 万年左右。

可能你会觉得奇怪：为什么两篇论文的结果会有天壤之别？这是因为开尔文勋爵中途意识到，基于当时的物理学理论，太阳最多只能燃烧几千万年。所以他就修改了自己的理论模型，从而大幅减小了地球的年龄。

不过，很快就有一群意想不到的人跑了出来，毫不留情地打了开尔文勋爵的脸。

著名美剧《生活大爆炸》的谢耳朵（谢尔顿，Sheldon），一位相当自负的理论物理学家，很喜欢贬损除理论物理以外的学科。他特别瞧不起地质学，甚至公然宣称地质学根本就不是一门真正的科学。很明显，他不太了解物理学史。因为跑出来怼开尔文勋爵的人，就是一群地质学家。

可能你要问了：“这群地质学家是怎么计算地球年龄的呢？”答案是：通过观察一些古老的沉积岩（图 1.16）。

在地球上，有一种很重要的岩石类型，叫作沉积岩。沉积岩的结构是一层层的，越下层的沉积岩，年代就越久远。通过研究某层岩石的沉积速度，就能计算出形成该层岩石所花费的时间；再把各层岩石的形成时间都加起来，就可以估算出形成整个沉积岩地形所花费的时间。那些地质学家就把这个时间，近似看成是地球的年龄。

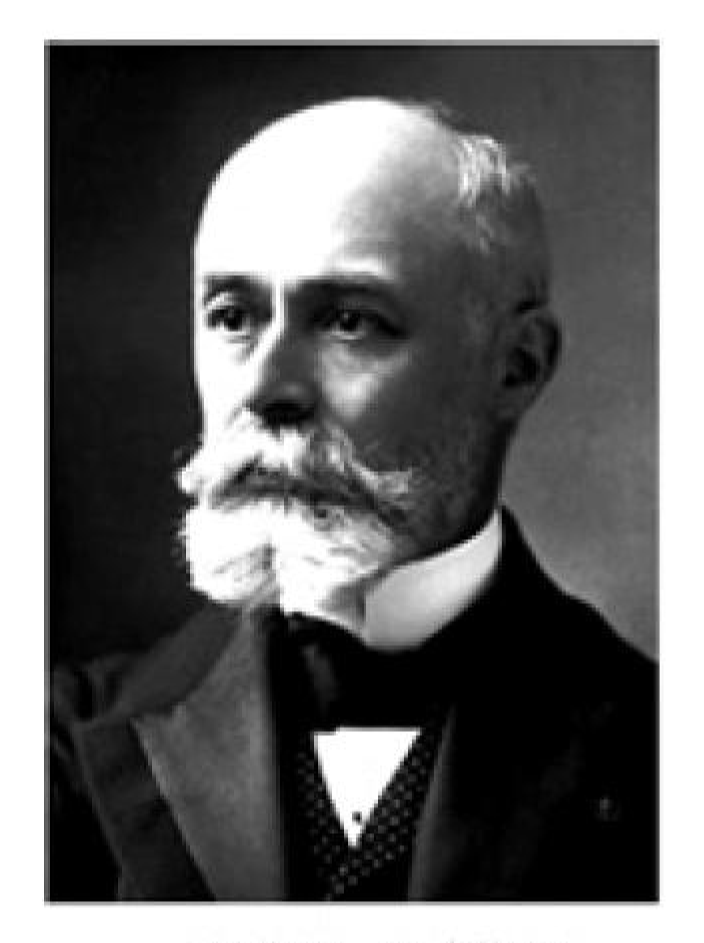


图 1.16　沉积岩

很多地质学家都用这种办法估算过地球的年龄，而他们算出来的数字明显大于开尔文勋爵公布的结果。举两个例子，查尔斯·达尔文曾在第一版的《物种起源》中宣称，地球的年龄至少在 3 亿年以上；而剑桥大学三一学院的地质学家塞缪尔·霍顿更是宣称，地球的年龄高达 23 亿年。

这样一来，关于地球的年龄，就有了势不两立的两派观点。开尔文勋爵认为，地球的年龄大概只有2400万年。而地质学家则认为，地球的年龄至少有好几亿年。双方一直公说公有理，婆说婆有理。但到了 1907 年，一个人的出现，彻底打破了天平的平衡。

为了说清楚其中的道理，我要先讲一讲什么是“放射性”。所谓的放射性，就是指一些不稳定的原子核会自发地放出某些射线，然后衰变成一些稳定的原子核的现象。1896 年，法国物理学家安东尼·贝克勒尔率先发现铀元素具有放射性。两年之后，皮埃尔·居里和玛丽·居里发现钋元素的放射性更强。这三人也因此共享了 1903 年的诺贝尔物理学奖（图 1.17）。



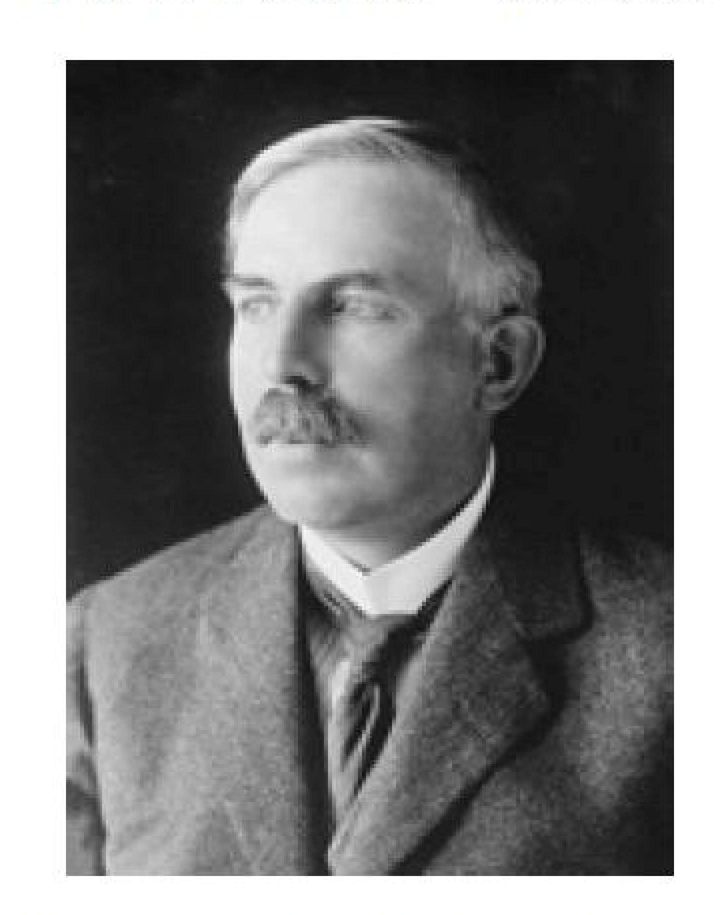
安东尼·贝克勒尔


皮埃尔·居里


玛丽·居里

图 1.17　1903 年诺贝尔物理学奖得主

顺便多说一句。本来，评奖委员会只打算把这个奖颁发给安东尼·贝克勒尔和皮埃尔·居里两人。但皮埃尔·居里非常爱他的妻子，坚决要求把居里夫人也列为获奖者，否则他就不去瑞典领奖。在征求了贝克勒尔的意见以后，评奖委员会做出了以下的决定：贝克勒尔独得 1/2 的奖金，而居里夫妇各得 1/4 的奖金。幸好由于皮埃尔·居里的坚持，居里夫人才没有被历史埋没。


图 1.18　欧内斯特·卢瑟福

到了 1907 年，打破天平平衡之人，终于登场了。他就是英国著名物理学家欧内斯特·卢瑟福（图 1.18）。

在物理学界，卢瑟福以看不起其他学科而出名。他曾说过这样一句名言："世界上所有的科学，不是物理学，就是集邮。"言下之意是，与物理学相比，其他自然科学都和集邮一个档次。这句话得罪了很多其他学科的科学家，其中反应最激烈的是化学家。事实上，他们甚至对卢瑟福进行了"报复"，给他发了一个诺贝尔化学奖。

在 20 世纪初，人们已经知道，对于含有放射性的元素，其部分的原子核会自发地衰变成其他元素的原子核，从而使放射性元素的质量减小。1907 年，卢瑟福发现了一个非常奇妙的现象：对所有放射性元素而言，其原子核衰变到只剩一半时所花费的时间（科学上称为半衰期）是固定不变的。比如说，100 千克的

某种放射性元素衰变得只剩 50 千克，与 50 千克的同种放射性元素衰变得只剩 25 千克，两者所花的时间完全相同。

卢瑟福的发现有很大的实用价值。比如说，如果某件古董里含有一种放射性元素，我们就可以通过测量这种放射性元素与它最后衰变成的那种元素之间的比例，来确定古董的年代。换句话说，我们可以把放射性元素的半衰期当成一个标准的时钟，来测量古老物体的年龄。事实上，要是比测量精度，无论是开尔文勋爵的热力学方法，还是地质学家的沉积岩方法，都比这种用放射性元素半衰期的方法差得远。

通过研究了一些古老矿石的衰变情况，卢瑟福发现地球的年龄至少有 7 亿年。这个结果宣告了地质学家的胜利。

更重要的是，卢瑟福的发现为地球年龄的测量指明了方向。只要能找到地球上最古老的岩石，然后再利用某种放射性元素的半衰期来计算它的年代，就可以估算出地球的年龄。当然，具体该用哪种放射性元素来测，还是一个悬而未决的问题。

下一个作出重要贡献的人是英国地质学家阿瑟·霍姆斯。霍姆斯主要关注铀元素的一种同位素铀 235。大家对铀 235 应该并不陌生，因为它后来成了制造原子弹的主要原料。铀 235 具有放射性，可以自发地衰变成铅 207；更关键的是，铀 235 的半衰期长达 7 亿年。所以它可以作为一个很理想的时钟来测量地球年龄。通过测定古老岩石中铀 235 和铅 207 的比例，霍姆斯在 1927 年发表了一篇文章，宣称地球的年龄介于 16 亿年到 30 亿年之间。而到了 1946 年，他又发表了一篇文章，宣称地球的年龄应该在 30 亿年以上。

1948 年，芝加哥大学地质学教授哈里森·布朗也对地球的年龄产生了浓厚的兴趣。但他意识到这是一个大坑，不想自己傻乎乎地往里跳。因此，布朗就把测定地球年龄的课题交给了自己的博士研究生克莱尔·彼得森（图 1.19）。为了让彼得森来跳这个坑，布朗忽悠他说这个课题“易如反掌”。结果，彼得森就这么被忽悠了进来。

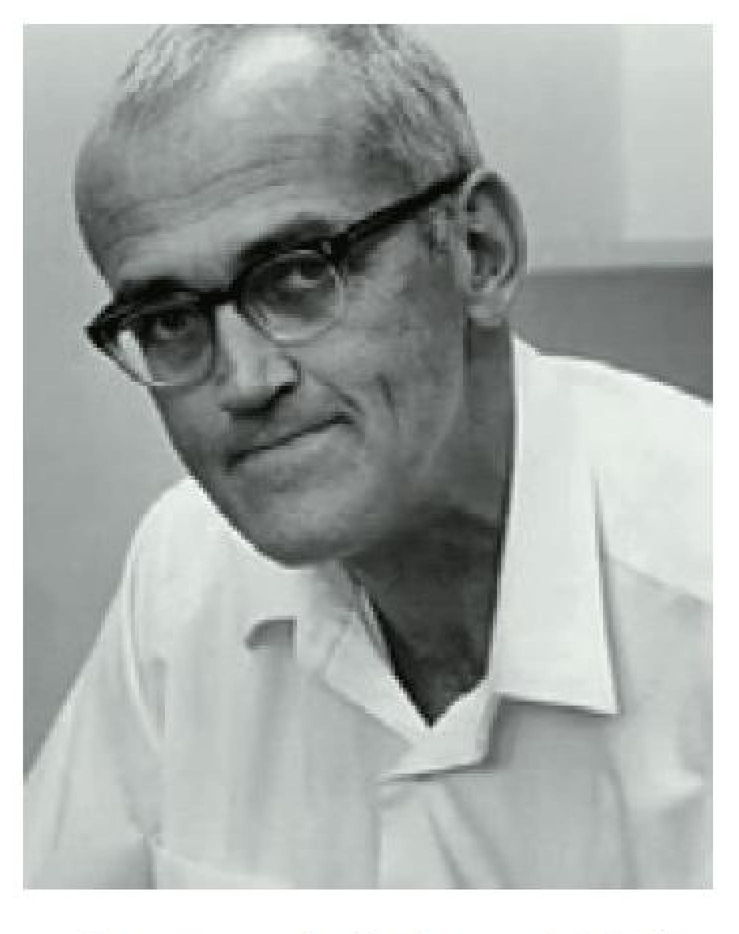


图 1.19　克莱尔·彼得森

这个世纪难题的终结者，就此登上了历史的舞台。

以前人们测量地球的年龄，都是去寻找一些特别古老的岩石。但问题在于，那些所谓的古老岩石，其实都是在地球诞生很久之后才形成的。换句话说，如果只是研究地球上的岩石，可能会大幅低估地球的年龄。

彼得森另辟蹊径，提出了一个非常大胆的猜想：从太空中掉下来的那些陨石，其实是太阳系形成初期剩下来的建筑材料，它们的内部还保留着太阳系最原始的化学组分。换句话说，这些陨石其实和地球一样古老。这样一来，只要用霍姆斯的办法，准确测出这些陨石到底存在了多少年，就能推算出地球的年龄。这个宛如天外飞仙般的奇思妙想，为解决地球年龄这个世纪难题带来了真正的曙光。

当然，通往成功的道路往往都不平坦。在实际测量过程中，彼得森遇到了一个很大的麻烦：陨石样品只要一接触到空气，样品中铅的含量立刻会显著上升；换言之，这些样品很容易受到空气中铅的污染。为了对付这个麻烦，彼得森在自己工作的加州理工学院建立了世界上第一个无菌实验室。他在无菌实验室里仔细挑选古老陨石的样品，并精确测定其中铀和铅的比例。他的努力，终于在 7 年之后获得了回报。

1955 年，彼得森在一次学术会议上正式宣布，地球的确切年龄是 45.5 亿年。这个结果，一直到现在也没有发生大的改变。在经过近百年的努力之后，人类终于测出了地球的年龄。

关于彼得森，不妨再多说几句。因为测出了地球的年龄，并不是彼得森人生的顶点。

成名之后，彼得森开始关心另一个问题：为什么大气中会含有这么多的铅？通过研究格陵兰岛上不同年代的积雪层，他发现大气中铅的含量是在 1923 年突然暴增的。而那一年，美国的三家巨无霸公司（通用汽车公司 、杜邦公司和新泽西标准石油公司）成立了一个叫作乙基汽油公司的合资企业，并开始向全世界出售含铅汽油。

从那以后，彼得森就开始了一场致力于保护环境的漫长斗争。他经常公开抨击乙基汽油公司，并呼吁政府尽快立法，以禁止含铅汽油的销售。

乙基汽油公司的反扑非常凶猛。它动用各种关系，让彼得森无法再获得任何科研经费。此外，它还向加州理工学院的董事会不断施压，想让彼得森丢掉饭碗。

这几乎是一个不可能完成的任务：一个普通人，要孤身对抗一个庞大的利益集团。幸好，彼得森没有放弃。在他的不断呼吁下，环保意识逐渐在美国民众的心中觉醒。1970 年，美国国会提出了《洁净空气法》；1986 年，美国政府禁止了一切含铅汽油的销售。在经历了几十年艰难的抗争，彼得森终于笑到了最后。

我们来做个总结。在 19 世纪末，基于热力学的研究，开尔文勋爵宣称地球的年龄应该是 2400 万年。但很快地，他就被一群地质学家打了脸；他们通过观察一些古老的沉积岩，算出地球的年龄至少有好几亿年。到了 1907 年，卢瑟福发现所有放射性元素的半衰期都固定不变；这个发现宣告了地质学家的胜利，同时也为地球年龄的测量指明了方向。20 世纪 20 年代，霍姆斯指出铀 235 的半衰期可以用来测量地球的年龄。而到了 1955 年，彼得森通过测量古老陨石中铀和铅的比例，发现地球的确切年龄应该是 45.5 亿年。在经过近百年的努力之后，人类终于测出了地球的年龄。

我已经讲完了地球的形状、大小、质量和年龄。下一节，我会聊聊地球到底具备哪些特殊的条件，从而变成了生命的绿洲。



1.4 为什么地球能成为生命的绿洲？

就目前所知，地球是唯一一个拥有生命的星球。在危机四伏、到处都是不毛之地的宇宙中，居然还存在一个如此美丽而生机勃勃的绿洲，实在是一个不折不扣的奇迹。

事实上，一个星球要想孕育出生命，是件极端困难的事情。不说其他因素，仅对这个星球本身而言，就必须同时满足以下三个条件：

第一，它必须有一个合适的质量，不能太小也不能太大。如果质量太小，它就无法靠自身引力阻止周围气体的逃逸，从而变成一颗没有大气层环绕的岩石星球；如果质量太大，它就会吸引太多的气体，从而变成一颗气态行星。在这两种情况下，生命都无法生存。

第二，它必须处于一个合适的位置，与恒星离得不能太近也不能太远。如果离得太近，星球的表面温度就会很高，让所有的水都变成水蒸气；如果离得太远，星球的表面温度就会很低，让所有的水都变成冰。换句话说，要想保证液态水的存在，这个星球必须位于一个狭小的圆环区域内，这就是所谓的宜居带。事实上，如果地球离太阳再远 5%，或者再近 15%，就会从这个宜居带里掉出去。

第三，它必须有一个合适的内部活跃程度，不能太平静也不能太剧烈。如果内部活动太平静，就不会产生地质活动，也无法形成大气和磁场；如果内部活动太剧烈，地震和火山就会持续不断地爆发，把这个星球变成一个活生生的地狱。

在接着讲地球为何是生命绿洲之前，我想先谈一个比较理论、也比较前沿的话题。

事实上，没有任何一个科学理论能决定一个星球的初始状态。换句话说，一个星球的质量、位置和内部活跃程度应该是完全随机的。既然如此，为什么地球能完美地满足这三大条件呢？

最早回答这个问题的人，是澳大利亚裔物理学家布兰登·卡特。如果你以前看过霍金的《时间简史》，应该会对这个名字有印象。事实上，卡特是英国物理

学家霍金的同门师弟，并且与霍金一起提出了著名的黑洞无毛发定理。

1973 年，卡特参加了一个纪念哥白尼 500 周年诞辰的学术研讨会。在这次研讨会上，他提出了一个影响深远的理论，那就是著名的人择原理。人择原理说的是，如果一个自然现象无法产生任何观察者，那么这个现象就不可能被观察到。这意味着，追问不可能被观察到的现象为什么不存在，是一件没有意义的事情。

有了人择原理，前面说的那个问题立刻就迎刃而解了。如果地球不满足这三大条件，地球上就不可能出现生命，也就不会出现像我们这样的智能生命来追问这个问题。换句话说，我们能追问这个问题，这本身就是这个问题的答案。

正是由于有合适的质量、位置和内部活跃程度，地球才得以长期拥有使她变成生命绿洲的三大要素，也就是海洋、大气和磁场。

让我们从地球的海洋说起。就目前所知，地球是独一无二的表面拥有液态水的星球。据科学家估算，地球拥有的总水量约为 13.76 亿立方千米，其中海水总量约为 13.35 亿立方千米，大概占地球总水量的 97%。一般来说，海水会吸收波长较长的红光、橙光和黄光，而反射或散射波长较短的绿光和蓝光，这会让大海看起来是蓝色的。由于海洋面积大概占地球总表面积的 75%，所以人们经常把地球称为蓝色星球。

众所周知，水是生命之源。现在有很多生物，没有氧气和阳光也能生活下去；但没有发现任何一种生物，能在没有水的情况下生存。事实上，地球上最早的生命，就诞生在海水之中。原因很简单。对于蛋白质之类的有机大分子而言，水是最好的溶剂。正是在液态水的环境中，这些有机大分子才可以互相混合，进而通过各种化学反应来形成复杂的结构，最终演化成真正的生命体。此外，水也是生命的很多新陈代谢活动的基础。举个例子，如果没有水，光合作用和呼吸作用就都无法再进行下去。从这个意义上讲，液态水是生命活动不可或缺的舞台。所以，地球能拥有液态水的海洋，实在是地球生命的福音。

但是，仅仅拥有海洋，还是远远不够的。因为在任何温度下，水都可以蒸发。举个例子，你要是把一盆水放在地上，时间长了，你就会发现这盆水变得越来越少，最后甚至完全消失。这是因为液态的水自发地变成了气态的水蒸气。同样的道理，海洋里的水，也会自发地变成水蒸气。如果没有其他因素阻止，这些水蒸气就会逃逸到太空中；久而久之，地球上的海洋全都会干涸。

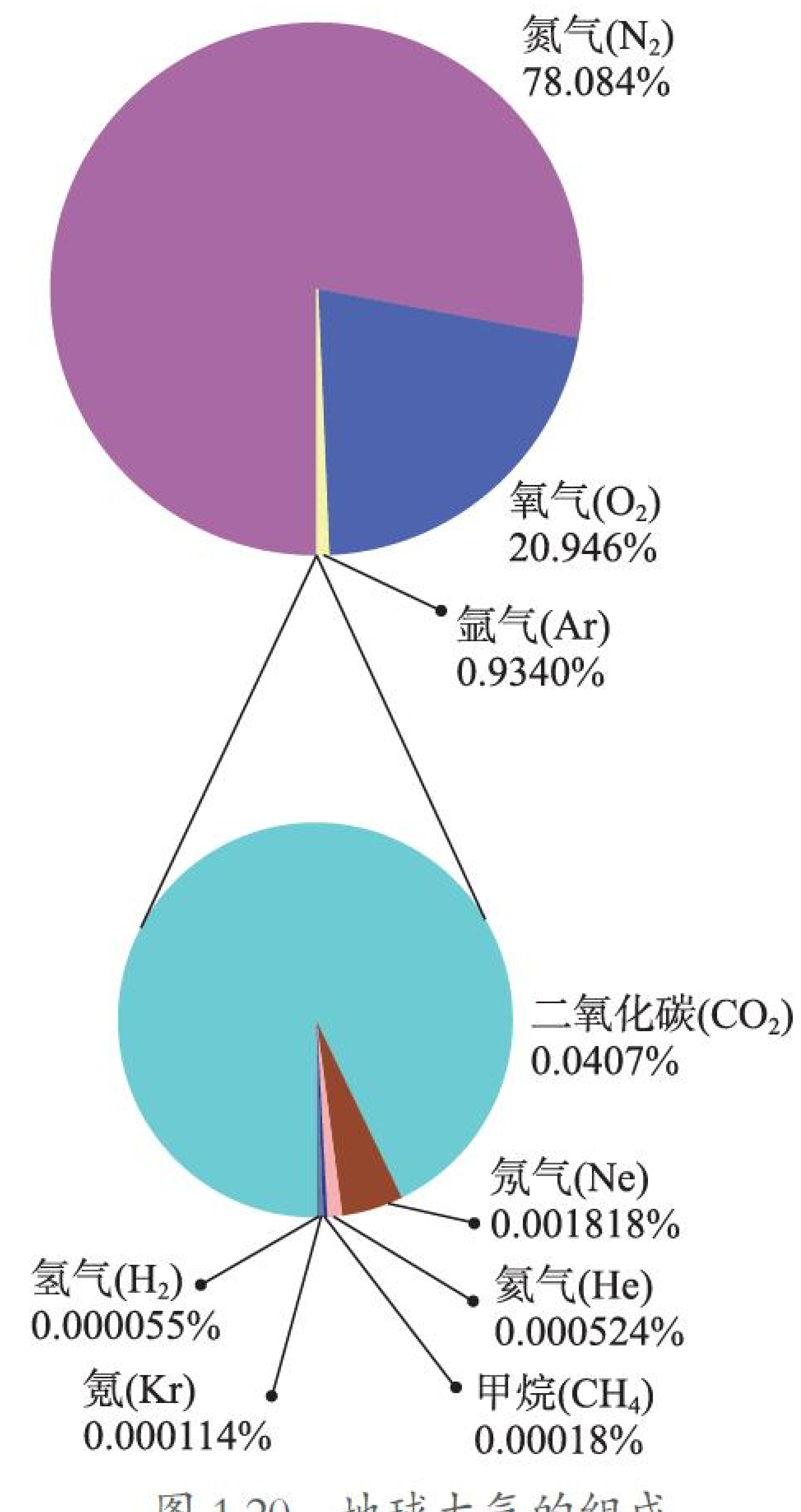


图 1.20　地球大气的组成

幸好，地球拥有阻止水蒸气逃逸的机制，那就是地球的大气。

众所周知，地球拥有一个大气层，也就是受地球引力吸引而环绕地球的一层混合气体（图 1.20）。据科学家估算，这层混合气体的总质量约为 5.15×10^{18} 千克，其中包含质量分数大约 78% 的氮气和 21% 的氧气，此外还包括氩气和二氧化碳在内的少量其他气体。

事实上，正是这个大气层阻止了水蒸气的逃逸。由于大气层的温度较低，水蒸气进入大气层以后，会遇冷而凝结成小水滴，然后再以降雨的形式返回地表。如果地球没有大气，这个水循环就会被打破；久而久之，地球表面的水就会蒸发殆尽。

事实上，地球大气还有很多其他的重要功能。比如说，地球大气中还含有一些温室气体，包括二氧化碳、水蒸气、甲烷和臭氧。温室气体最大的特点是，对波长较短的电磁波几乎没什么影响，而对波长较长的电磁波有很强的吸收能力。太阳表面的温度很高，辐射出来的电磁波能量高波长短，所以不会受到温室气体的阻碍，能顺利到达地球表面。而地球表面的温度较低，辐射出来的电磁波能量低波长长，所以会有很大一部分被温室气体拦截下来。因此，温室气体的存在能让行星表面的温度升高，这就是所谓的温室效应。据科学家估算，如果没有温室效应，地球表面的平均温度大概会下降 32℃。

此外，地球大气层中还有一个臭氧层，大致分布在与地球表面相距 20 ~ 30 千米的环形区域。臭氧层能吸收掉太阳光中 97% 的紫外线。如果没有这个臭氧层，这些高能的紫外线就会直接照射到地球表面，从而对地球生命造成严重的威胁。

不是什么天体都能拥有大气层。比如说，我们熟悉的月球就没有。那到底什么样的天体能拥有自己的大气层呢？这取决于它的质量和它与太阳之间的距离。一方面，大气会受到这个天体引力的吸引，从而被束缚在此天体的周围。引力束缚的

强弱取决于天体的质量：质量越大，引力的束缚就越强。另一方面，大气又会从太阳那里获得热量，从而产生逃跑的动力。逃跑动力的大小取决于天体与太阳之间的距离：离得越近，大气逃跑的动力就越强。这两股力量一直在彼此斗争。如果引力的束缚占了上风，行星就能拥有自己的大气层；如果逃跑的动力占了上风，行星就会变成光秃秃的样子。我们的地球能拥有大气层，就是地球引力占上风的结果。不过，只是引力占上风，还不足以让一个天体一直保有大气层。地球之所以能一直保有大气层，是因为它还有一个强大的磁场。

地球磁场（图 1.21）其实是一个从地球内部一直延伸到太空中的巨大磁场。中国古代四大发明之一的指南针之所以能够辨别方向，就是由于这个地球磁场的存在。不过，地球磁场的磁轴与地球的自转轴并不重合，两者之间还存在着一个 11 度的夹角。此外，地球磁场的南北极其实与地理上的南北极相反。

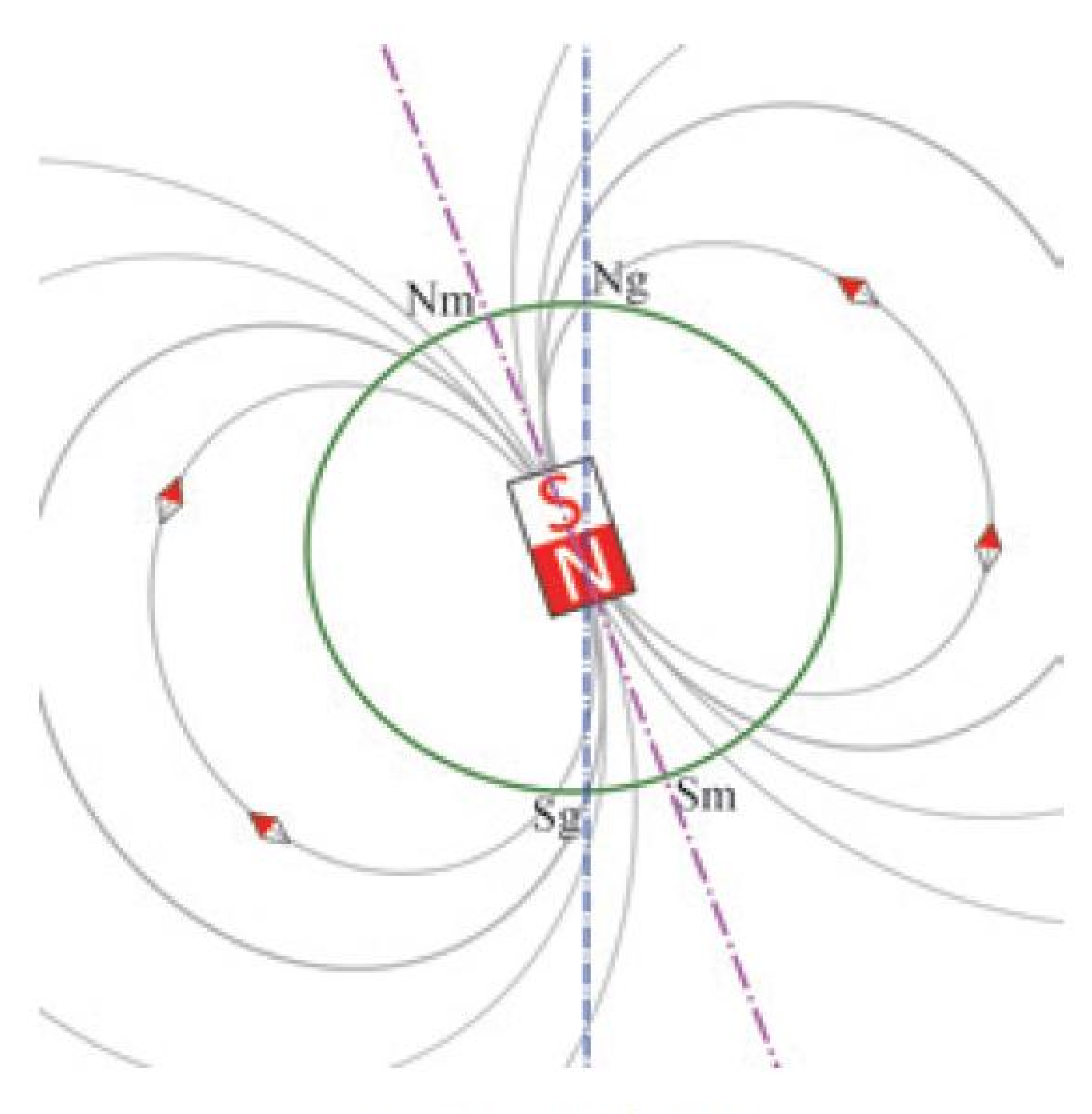


图 1.21　地球磁场

地球磁场最主要的作用是抵御太阳风。太阳风是太阳发出的高能带电粒子流，主要由处于电离状态的氢和氦（也就是去掉外层电子的氢原子核和氦原子核）构成。由于这些带电粒子流具有很高的能量，地球的大气层无法阻止太阳风的长驱直入。所以，要是没有别的东西来阻止它，太阳风就会一直刮到地表，对地球生命造成严重威胁。

幸好，地球有强大的磁场。众所周知，在磁场中，带电粒子的运动轨道会发

生偏转。因此，地球磁场能迫使太阳风中的高能带电粒子朝地球两极的方向发生偏转。到了两极地区，这些带电粒子会与位于高层的大气分子发生碰撞，从而形成美丽的极光（图 1.22）。

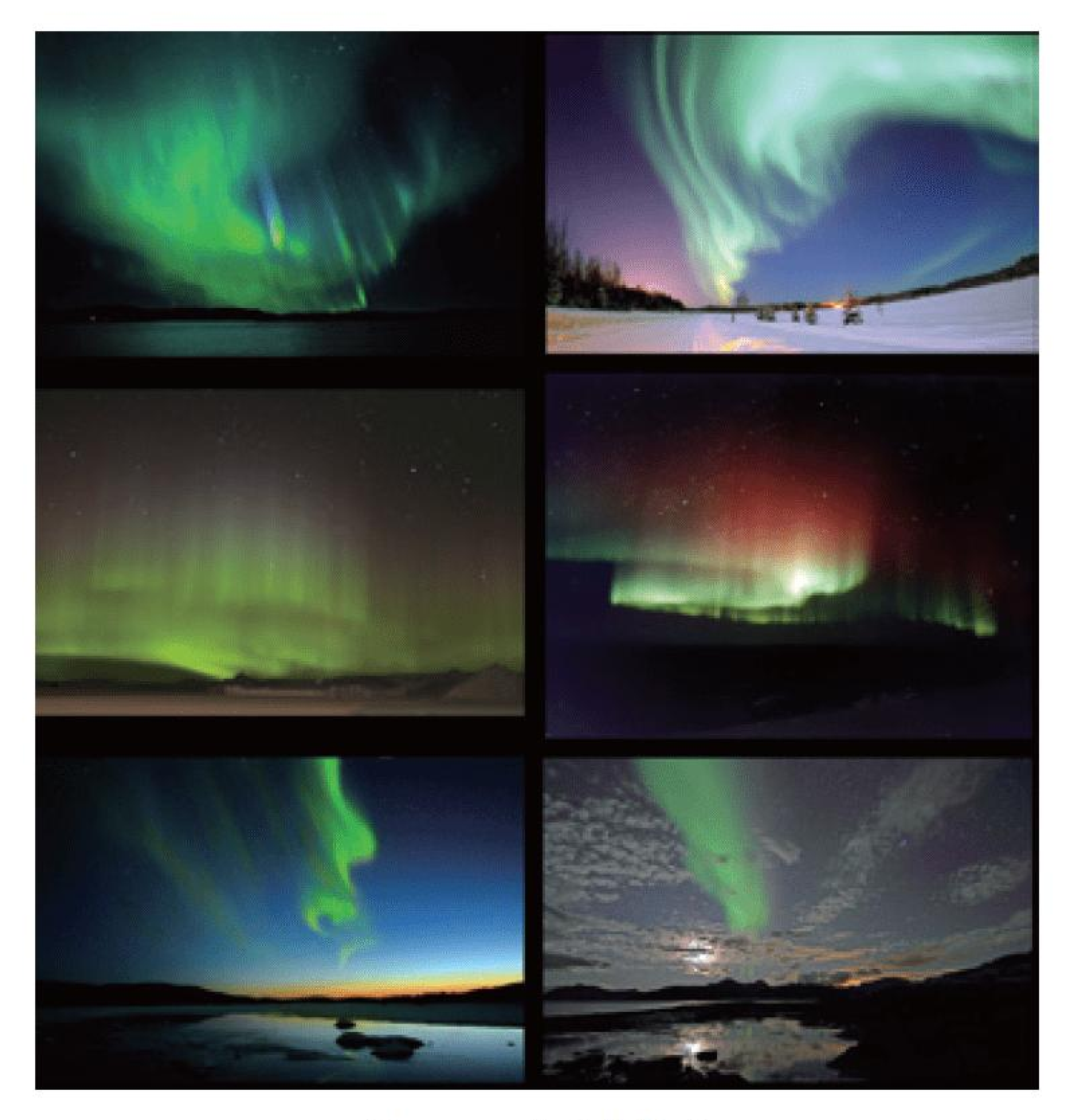


图 1.22　美丽的极光

更重要的是，地球磁场阻止了太阳风剥离地球大气。如果太阳风能直接轰击到地球大气层，这些高能带电粒子就会把自身的能量传递给地球的大气分子，从而让它们可以挣脱地球引力并逃逸到太空中。久而久之，地球的大气层就会被太阳风逐渐剥离。幸好，地球磁场构筑了一个天然的屏障，有效地阻止了太阳风与地球大气的直接接触。这样一来，地球引力就可以牢牢地束缚住大气分子，从而让地球一直保有自己的大气层。

我们来做个总结。就目前所知，地球是唯一一个拥有生命的星球。由于有合适的质量、位置和内部活跃程度，地球得以长期拥有海洋、大气和磁场。海洋为生命的诞生提供了舞台，大气阻止了海洋的蒸发，而磁场保证了大气不会被太阳风剥离。正是由于这三大要素，地球才成为一个美丽的生命绿洲。

02

月球





2.1 为什么月球总是一面朝向地球?

离开了地球，让我们前往这次太阳系之旅的第二站：月球（图 2.1）。



图 2.1　月球

质量：7.342×10^{22} 千克（地球质量的 1.23%）
体积：2.196×10^{19} 立方米（地球体积的 2%）
与地球的平均距离：3.844×10^{5} 千米（日地距离的 0.26%）

月球是地球唯一的天然卫星。它与地球的平均距离约为 38 万千米，并自西向东沿逆时针的方向围绕地球旋转。与此同时，它也在自西向东沿逆时针的方向自转。值得一提的是，月球是一颗相当巨大的卫星：它的直径大概是地球的 27%，而质量大概是地球的 1.23%。这个相对比例在太阳系所有的卫星中都是

鹤立鸡群的。

前面说过，月球本身不会发光，只能反射太阳光。由于反射太阳光的能力不同，月球表面就呈现出了明暗交错的样子。明亮的区域是月球上的高原，被称为月陆；而阴暗的区域是月球上的盆地，被称为月海。月球表面还有一个很显著的特征：到处都是星罗棋布的环形山。所谓的环形山，其实就是小行星或彗星撞击月球表面所形成的大坑，因此也被称为撞击坑。据统计，光是直径超过 1 千米的撞击坑，在月球上就有不下 30 万个。

很早以前，人们就注意到了一个非常诡异的现象：月球总是一面朝向地球。换句话说，我们在地球上只能看见月球的一面（即正面），而永远看不见它的另一面（即背面）。这到底是怎么回事呢？

为了回答这个问题，让我从一个大家非常熟悉的自然现象说起。

众所周知，地球上的海水每天都会周期性地发生涨潮和落潮，这就是所谓的潮汐现象。其中“潮”由“水”和“朝”组合而成，代表“早上的涌水”；而“汐”由“水”和“夕”组合而成，代表“黄昏的涌水”。“潮”和“汐”合在一起，就描述了海水每天在与海面垂直方向上的周期性涨落。

那为什么会发生潮汐呢？最早猜出正确答案的人，是大天文学家约翰内斯·开普勒（图 2.2）。



图 2.2 约翰内斯·开普勒

前面说过，开普勒于 17 世纪初提出了著名的行星运动三定律，因而被后世称为“天上的立法者”。但不幸的是，如果要用一个字来形容这个科学巨人的生活，那个字肯定是“惨”。

开普勒出身贫寒，一直都很贫穷。1601 年，他当上了神圣罗马帝国的皇家天文学家。这听起来挺高大上的。但由于神圣罗马帝国长年打仗，国库空虚，所以就把开普勒的薪水砍到了只有他前任的一半。即使如此，开普勒依然会时不时地被拖欠工资。

最严重的一次欠薪发生在 1630 年的下半年。那一次，开普勒被拖欠了好几个月的工资，家里已经穷得揭不开锅了。无奈之下，他只好做了一次长途旅行，跑到雷根斯堡去找皇帝讨薪水。但不幸的是，刚到雷根斯堡没多久，开普勒就得

了一场大病，不但没有讨到薪水，反而把自己的性命给赔进去了。

开普勒生前贫寒，死后也没有得到安宁。去世以后，他被葬在了雷根斯堡的一个教堂。但是“三十年战争”后来还是席卷了雷根斯堡，把那个教堂，包括开普勒的墓地，全都夷为平地。时至今日，人们也无法再找到开普勒的安息之处。唯一流传下来的，是他自己给自己写的墓志铭：“I measured the skies, now the shadows I measure; Skybound was the mind, earthbound the body rests.（我曾测天高，如今又量地深；上天赐予我灵魂，大地收容我的俗身。）”

1609 年，开普勒提出了一个关于潮汐起源的理论。他认为，地球上之所以会有潮汐，主要是由于月球的吸引力。事实上，这个理论已经远远超越了时代。因为要再等整整 78 年，牛顿才能提出万有引力定律。直到那时，人类才能彻底地理解潮汐的起源。

图 2.3 就是地球上能产生潮汐现象的原理图。

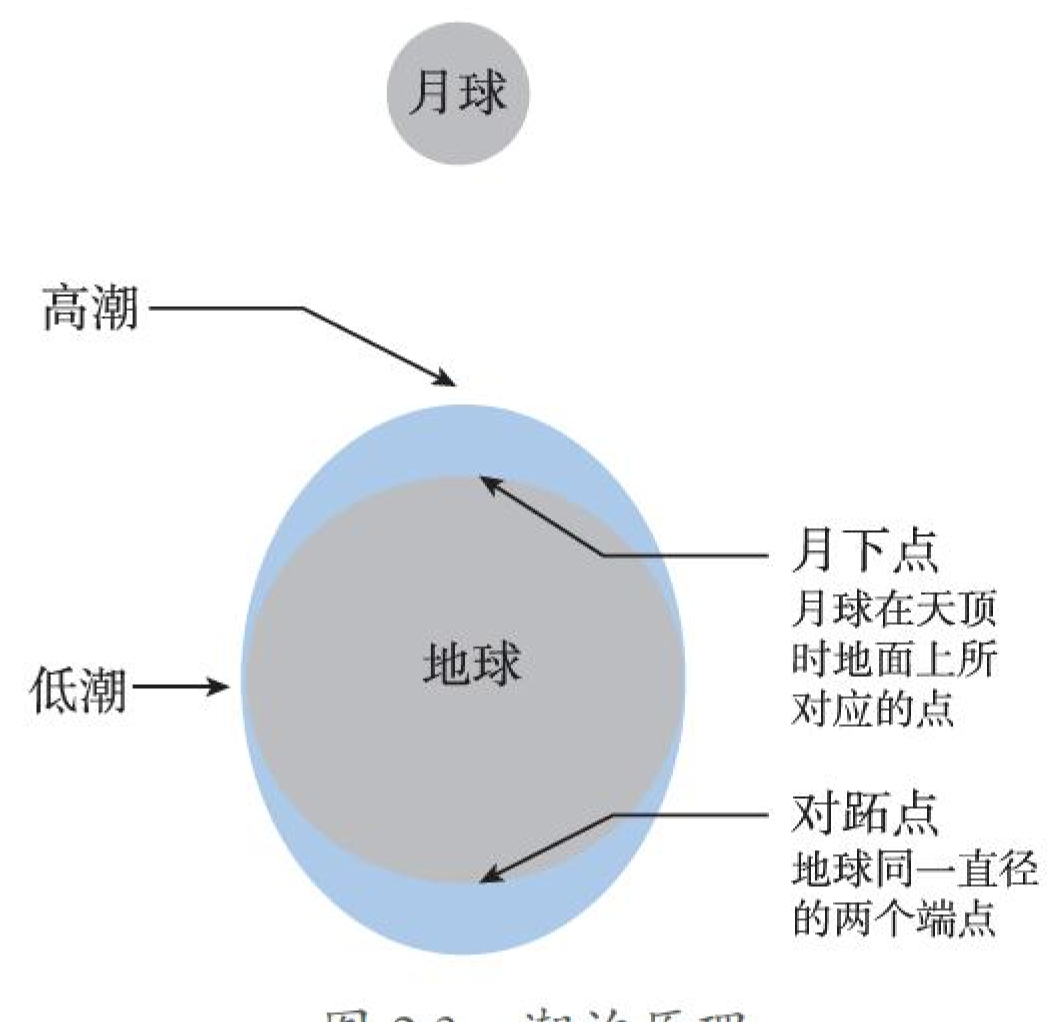


图 2.3　潮汐原理

由于地球本身有一定的大小，地球表面就会有一个地方离月球最近（也就是图中的月下点），同时还有一个地方离月球最远（也就是图中的对跖点）。牛顿的万有引力定律告诉我们，任意的两个物体之间都存在引力，而且引力的大小与它们距离的平方成反比。这样一来，因为离得最近，月下点受到的月球引力就最大；而由于离得最远，对跖点受到的月球引力就最小。这种引力的差异就是所谓的潮汐力。

很明显，在潮汐力的作用下，地球表面的海水就会在地月连线的方向上发生“隆起”的现象。换句话说，在月下点和对跖点，海水会出现高潮；而在两者中间

的圆环区域，海水会出现低潮。由于月球在不断地绕着地球旋转，月下点和对跖点的位置就会发生周期性的改变，从而使全球的海水出现周期性的涨潮和落潮。这就是潮汐现象的由来。

很明显，月球本身也有一定的大小，所以地球对月球同样也会有潮汐力。虽然月球上没有海洋，但是地球的潮汐力可以直接作用在月球的岩石上；这样一来，月球也会在地月连线的方向上发生“隆起”。

在遥远的过去，月球的自转速度比现在要快不少，使月球正对地球的位置不断发生改变。这样一来，月球受地球潮汐力而“隆起”的部位也在不断发生改变，从而对月球内部的岩石产生了一个摩擦力。所谓的摩擦力，是一种能阻碍物体运动的力量；在日常生活中，让汽车火车能够停下来的，就是这种力量。正是这个摩擦力，减慢了月球的自转速度。

最终，地球的潮汐力把月球的自转速度减慢到了一个临界值：27.32 天自转一圈。换言之，月球的自转周期恰好与它绕地球转一圈的周期相等，从而让月球的一面一直都朝向地球。此时，月球受地球潮汐力而“隆起”的部位不再发生改变，从而让月球内部的岩石不再受摩擦力，进而达到一个稳定的平衡状态。这意味着，这个月球自转速度就不再发生改变，从而使月球的一面永远都朝向地球。这在科学上被称为“潮汐锁定”。

顺便再多说一句。潮汐力不仅能减慢月球的自转速度，还能减慢地球的自转速度。事实上，与创生之初相比，目前地球的自转速度已经被减缓了一半以上。换句话说，正是由于月球的潮汐力，地球上的一天才由最初的 10 小时变成了今天的 24 小时。

我们来做个总结。很早以前人们就注意到，月球总是一面朝向地球。这是月球被地球引力潮汐锁定的结果。由于月球本身有一定的大小，它会受到地球的潮汐力，从而在地月连线的方向上发生“隆起”。这对月球内部的岩石产生了一个摩擦力，进而减慢了月球的自转速度。最终，月球的自转速度被减慢到 27.32 天自转一圈，这恰好与月球绕地球转一圈的周期相等。此后，月球达到了稳定的平衡状态，从而使月球的一面永远都朝向地球。

除此以外，科学家们还发现了一件有趣的事情：地球与月球间的平均距离，大概每年都会增加 3.8 厘米。听起来有点不可思议吧。这么微小的距离变动，到底是怎么测出来的？这就不得不提到人类历史上最著名的航天项目：阿波罗计划。

2.2 阿波罗计划留下了怎样的传奇故事？


图 2.4　冯·布劳恩


图 2.5　谢尔盖·科罗廖夫

第二次世界大战结束后，美国和苏联开始了漫长的“冷战”。双方展开竞争的一个最激烈也最引人瞩目的领域是太空探索，这就是著名的美苏太空争霸。

美国航天事业的灵魂人物，是著名的火箭科学家冯·布劳恩（图 2.4）。

冯·布劳恩出生在德国的一个贵族家庭，从小就对航天特别感兴趣。在柏林洪堡大学获得物理学博士学位以后，他作为总设计师，主持研发了世界上第一种弹道导弹：V2 火箭。目前，V2 火箭已被公认为现代导弹和火箭的鼻祖。1945 年，在德国战败之后，冯·布劳恩带着他的研发团队集体向美军投降。他们被秘密地转移到了美国。但由于曾是德国纳粹分子，在长达 12 年的时间里，冯·布劳恩一直得不到美国人的重用。

而此时苏联的航天事业正由另一位传奇人物领导，他就是著名的火箭科学家谢尔盖·科罗廖夫（图 2.5）。

科罗廖夫的人生同样非常坎坷。在他 3 岁那年，他的父母因感情破裂而分居；科罗廖夫就被母亲带回了娘家，与自己的外公外婆一起生活。由于没有父亲，小时候他经常被班上的坏孩子欺负。大学毕业以后，科罗廖夫成了一名飞机设计师。20 世纪 30 年代初，他结识了被后世称为航天学之父的康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基，随后开始改行研究火箭。1933 年，科罗廖夫当上了新成立的喷气科学研究所的副所长。不过好景不长。1937 年，斯大林开始大清洗；1938 年，科罗廖夫因莫须有的罪名被捕入狱，随后被流放到

西伯利亚的集中营去做苦役。第二次世界大战爆发后，科罗廖夫被调到莫斯科的一家监狱工厂，以戴罪之身进行军用火箭的研究。1944 年，科罗廖夫重获自由，随后成了苏联航天事业的领导者。

在美苏太空争霸之初，两个大国较量的是看谁能把第一颗人造卫星送上太空。由于美国对冯·布劳恩心怀芥蒂，而苏联全力支持科罗廖夫，胜负的天平开始向苏联人倾斜。

1957 年 10 月 4 日，苏联成功发射了世界上第一颗人造卫星“斯普特尼克 1 号”。在 3 个月的时间里，这颗卫星环绕地球飞行了 1440 圈，总飞行距离超过 7000 万千米。这一壮举，标志着人类从此进入了太空时代。

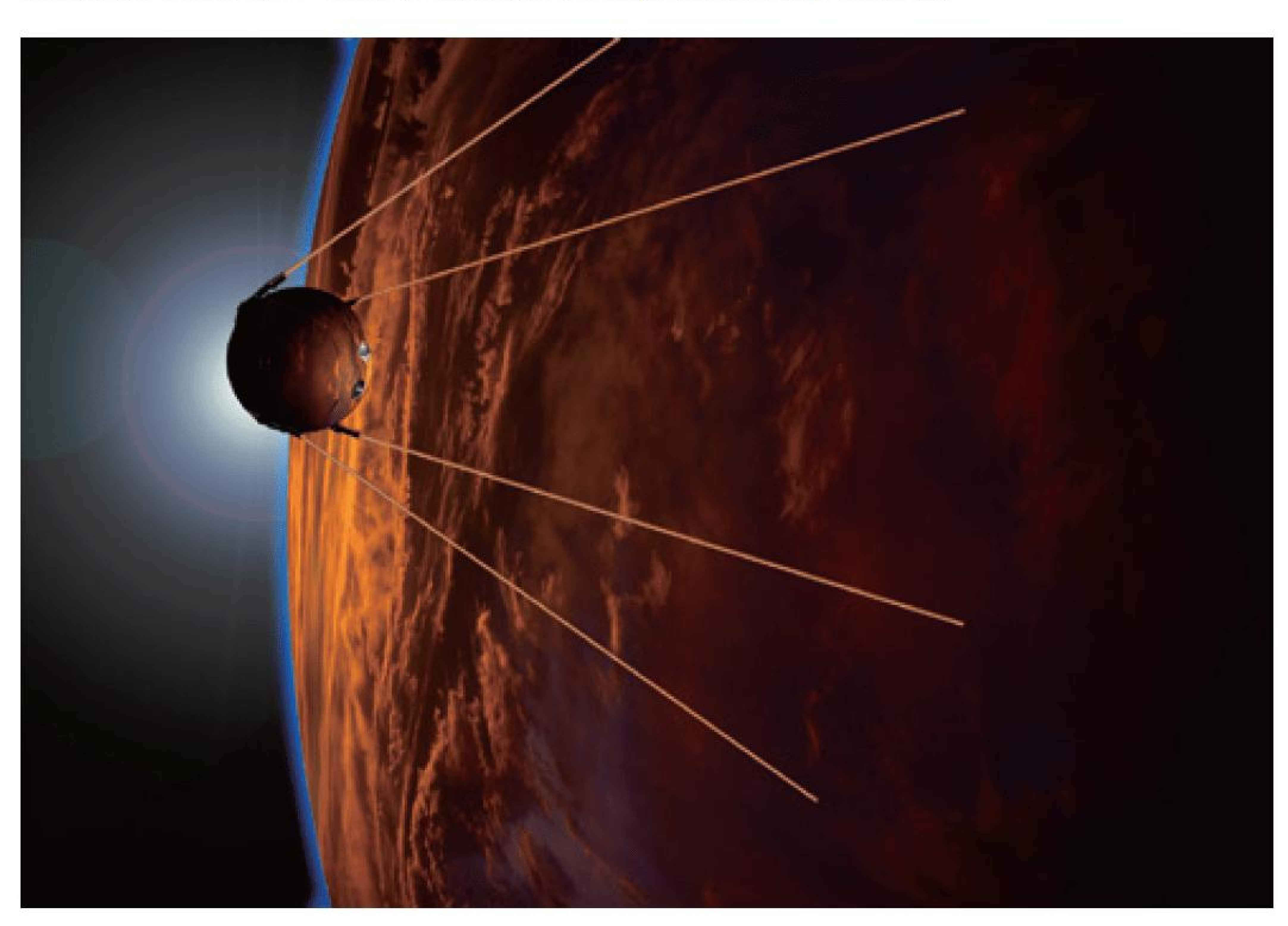


图 2.6　斯普特尼克 1 号

顺便再说一件趣事。此后不久，瑞典皇家科学院就向克里姆林宫致函，说他们打算提名这颗人造卫星的总设计师为下一年度的诺贝尔物理学奖的候选人，想要知道此人到底是谁。为了保密，克里姆林宫并没有透露科罗廖夫的名字，而是回复说设计师是全体苏联公民。

人造卫星的较量结束后，美苏太空争霸的焦点就转向了载人飞行。为了挽

回极端不利的局面，美国总统艾森豪威尔于 1958 年 7 月 29 日签署法案，创立了美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA），全面负责美国的太空计划。除此以外，美国人还做出了一个非常重要的决定：起用冯·布劳恩的研发团队。

这些举措并没有取得立竿见影的效果。1961 年 4 月 12 日，苏联又完成了一个壮举：苏联宇航员加加林乘坐东方 1 号宇宙飞船，历时 1 小时 48 分钟绕行地球一周，然后安全返回地球，从而完成了人类历史上的首次载人宇宙飞行。苏联人又一次把美国人甩在了身后。

不过，局势正在悄悄地发生变化。1960 年底，科罗廖夫第一次被查出患有心脏病。此后的几年，由于极度的劳累和巨大的工作压力，他的病情逐渐恶化。1966 年 1 月，科罗廖夫因心脏病突然发作而去世，享年 59 岁。从那以后，胜利女神开始向美国人露出微笑。



图 2.7　阿波罗计划

载人飞行之后，双方竞争的焦点就转向了载人探月。1967 年，NASA 启动了人类历史上最昂贵的科研项目，那就是著名的阿波罗计划（图 2.7）。

其实阿波罗计划同样出师不利。1967 年 1 月 27 日，编号为 AS-204（A 代表阿波罗，S 代表土星火箭，2 代表 IB 型火箭，04 代表第 4 次发射）的飞船，在一次例行测试中突然发生大火，导致三名宇航员当场丧生。应这些遇难宇航员遗孀的要求，NASA 把这艘出事的飞船命名为了阿波罗 1 号，以纪念这个还未开始便已结束的旅程。

但此后，阿波罗计划渐入佳境。1967 年底，冯·布劳恩的团队成功研制出了土星 5 号运载火箭（图 2.8）。直到今天，土星 5 号依然是世界上最强大的运载火箭，它可以把 140 吨的航天器送上近地轨道。作为对比，现役火箭中运力最大的“Space X”公司生产的猎鹰重型火箭，只能把 63.8 吨的物体送上近地轨道，其运力还不到土星 5 号的一半。正是这个著名的土星 5 号火箭，让人类实现了飞向月球的梦想。



图 2.8 土星 5 号火箭

1968 年 12 月 21 日，人类迈出了载人探月的关键一步。当天发射的阿波罗 8 号，带着 3 名宇航员成功抵达了近月轨道；在环绕月球飞行了 20 个小时以后，它又于 12 月 27 日顺利返回地球。这也让阿波罗 8 号成为人类历史上第一个离开地球轨道的载人飞船。

当然，名气最大的还是阿波罗 11 号。这艘于 1969 年 7 月 16 日发射的载人飞船，首次将两名宇航员尼尔·阿姆斯特朗和巴兹·奥尔德林，送上了月球。他们在月球表面工作了两个多小时，把 21.55 千克的月球岩石带回了飞船。第一个登上月球的阿姆斯特朗还说了一个特别有名的金句："这是个人的一小步，却是人类的一大步（图 2.9）。"

关于阿姆斯特朗，不妨再多说两句。回地球后不到两年，他就从美国宇航局退休，跑到辛辛那提大学的航空工程学院当了一名教授。但他在那里过得很不如意。因为他的同事全都是博士，而他只有一个硕士的文凭；此外，他的教学和科研水平，也明显是学院的短板。所以八年后，阿姆斯特朗又从大学辞职，成了数家美国公司的广告代言人。由于工作需要，他经常东奔西跑，没有时间来陪伴家人。他的妻子无法忍受，和他离了婚。晚年的阿姆斯特朗跑到乡下买了一个农庄，开始了自己的半隐居生活。有个邻居建议他多出去旅游，好散散心。但阿姆斯特

朗只用一句话就堵住了那个邻居的嘴："我连月球都去过了，地球上还有什么地方能吸引我呢？"



图 2.9　人类第一次登月

从 1969 年 7 月至 1972 年 12 月，阿波罗计划总共发射了 7 艘载人飞船，把 12 名宇航员送上了月球。一直到现在，除了这 12 个人以外，再也没有其他人登上月球。

不过在这 7 次载人探月任务中，也出现了一次非常重大的事故，那就是后来被拍成好莱坞大片的阿波罗 13 号。

千里之堤，溃于蚁穴。阿波罗 13 号的灾难也是由一件微不足道的小事引发的。

在讲阿波罗 13 号的故事之前，让我先简单说说阿波罗飞船上的燃料电池。它的工作原理很简单，就是让氢和氧发生化学反应，产生水和化学能；水可以供宇航员饮用，而化学能则可以转化为电能。

要想携带更多的氢和氧，就要让它们处于液态。因此阿波罗飞船一般会装两个液氢罐和两个液氧罐。问题就出在其中的一个液氧罐上。

这个液氧罐本来是为阿波罗 10 号准备的。但在阿波罗 10 号发射前出了一个小事故：这个液氧罐从 5 厘米高的平台上掉了下来。按理说，从 5 厘米高的地方掉下来，并没有什么大不了。但为了安全起见，NASA 没把这个液氧罐装在阿波罗 10 号飞船上。

在此后的检查中，NASA 的工作人员没发现这个液氧罐有任何破损。不过这些检查全都是从外部进行的，并没有检查液氧罐内部的情况。检查过后，NASA 就把这个液氧罐分配给了阿波罗 13 号。这就是后来引起龙卷风的那只蝴蝶。

在阿波罗 13 号发射前，NASA 的工作人员又做了一次例行检查，然后发现这个液氧罐无法彻底排空其中的液氧（事后分析，这可能是由于上次掉落所造成的内部损坏）。他们决定用给液氧罐加热的方法来排空液氧。但在加热过程中，他们犯了一个非常严重的错误。加热液氧罐本该使用飞船上的 28 伏电源，但他们却直接用了地面的 65 伏电源。过高的电压使液氧罐内部的温度超过了 500℃，从而让它的内部受到了极为严重的破坏。最关键的是，由于安装在液氧罐内部的温度计最高只能显示 26℃（即 80°F），所以从外部观察还是一切正常。掉落造成的小损坏，就这么演变成了加热造成的大损坏。

这个内部严重损坏的液氧罐，被装在了 1970 年 4 月 11 日发射的阿波罗 13 号上。在飞船发射了 56 个小时以后，此液氧罐在离地球 33 万千米远的地方发生了大爆炸。

在爆炸发生 30 秒后，NASA 位于休斯敦的地面指挥中心收到阿波罗 13 号传来的讯息。阿波罗 13 号的指令长詹姆斯·洛威尔说了那句后来家喻户晓的“名言”：“休斯敦，我们有麻烦了。（Houston, we have a problem.）”

然而，这是一次极为成功的“失败”。在与地球相距 33 万千米的太空中发生这么严重的事故，飞船上的三位宇航员最后竟然还能奇迹般地生还。

按理说，爆炸发生后应该让飞船立刻掉头并返回地球。但问题是，要想掉头，必须用一台强大的引擎来调整轨道。不幸的是，阿波罗 13 号的主引擎已经在爆炸中受损。NASA 最后决定维持原来的航线，让飞船利用月球的引力来变轨，然后再返回地球。

不幸中的万幸是，阿波罗 13 号的登月舱没有在这次爆炸中受损。登月舱上有独立的生命维持系统，以及为登月准备的水和氧气。此外，登月舱上还有两台

引擎，可以用来调整航线。原来的登月舱，就这样变成了三名宇航员的救生艇。

尽管如此，三名宇航员的回家之路依然困难重重。一个很要命的问题是，登月舱里的物资是为两名宇航员在月球上待一天半而准备的，但现在却要用来维持三名宇航员 4 天的生活。相对而言，氧气不算太缺，最缺的是水和电。没水只能少喝，没电也只能省着用。为了省电，这些宇航员关闭了除生命维持和星际通信以外的所有电力设备。加热设备关闭后，登月舱中的温度急剧下降，把他们都冻得难以入眠。

另一个很严重的问题是，登月舱里的小型空气过滤器不足以过滤三名宇航员在 4 天内排出的所有二氧化碳。如果不采取措施，他们就会有中毒身亡的危险。好在 NASA 的工程师临时想出了办法，指导这三名宇航员用一些胶带、纸板和塑料片，做了一个能让空气过滤器更有效工作的简易装置，这才勉强渡过难关。

寒冷、脱水、缺氧、恐惧，在这种极端恶劣的环境下苦苦支撑了 4 天之后，这三名宇航员终于回到了地球。1970 年 4 月 17 日，阿波罗 13 号的指令舱成功降落在南太平洋中，并被随后赶到的美国海军所营救。

顺便多说一句。死里逃生的阿波罗 13 号指令长洛威尔后来写了一本相当畅销的书——《失之交臂的月球：阿波罗 13 号的危险旅程》。这本书被改编成了著名的好莱坞大片《阿波罗 13 号》。饰演洛威尔的男演员，是好莱坞著名影星、两届奥斯卡影帝汤姆·汉克斯。事实上，洛威尔本人也在电影中客串了一个角色：把三名宇航员营救出来的那艘美国军舰的舰长。

我们来做个总结。在美苏太空争霸之初，苏联一度占据了明显的上风，发射了世界上第一颗人造卫星，并完成了历史上第一次载人飞行，一时风头无两。但随着美国开始重用冯·布劳恩，以及科罗廖夫因心脏病而去世，胜利女神开始对美国露出微笑。1967 年，美国启动了著名的阿波罗计划。从 1969 年 7 月至 1972 年 12 月，阿波罗计划总共把 12 名宇航员送上了月球。不过阿波罗计划中名气最大的，却是一次极为成功的“失败”。由于蝴蝶效应，阿波罗 13 号的一个液氧罐在离地球 33 万千米的太空中发生了爆炸；但在 NASA 的全力营救下，飞船上的三名宇航员最后竟然奇迹般地生还。这个极富传奇色彩的故事，被好莱坞拍成了一部大片，那就是《阿波罗 13 号》。

除了巨大的政治意义，阿波罗计划也有一定的科学价值。比如说，阿波罗计

划在月球表面放了一面镜子。后来，科学家就从地球上向这面镜子发射激光，然后通过激光往返的时间来测量地球与月球间的距离。结果表明，月球大概每年都会远离地球 3.8 厘米。

更重要的是，阿波罗计划还从月球上带回了大量的月球岩石样本。正是这些岩石样本，为人类揭开了月球起源的奥秘。

2.3 月球是怎么起源的？


图 2.10　阿尔弗雷德·魏格纳

为了解释月球的起源，让我们先从一个气象学家的故事讲起。他就是德国气象学家阿尔弗雷德·魏格纳（图 2.10）。

1910 年的一天，魏格纳由于一场大病而住进了医院。那个年代可没有电视、计算机和互联网，穷极无聊的魏格纳只好看他病房墙上的一张世界地图来打发时间。但仔细研究了这张世界地图以后，魏格纳发现了一件非常诡异的事：非洲西部的海岸线与南美洲东部的海岸线非常吻合；换言之，非洲和南美洲就像是一块大陆被硬生生地从中间撕开。随后，他注意到更多的大陆也能像拼图般拼合在一起。

出院以后，魏格纳又得知了一件怪事：在非洲和南美洲都发现了一种古代爬行动物的化石，也就是所谓的中龙。据科学家推断，中龙只能在淡水中生活，而不能生活在海水中。那么，它为什么能横渡数千千米的大西洋呢？

为了解释这些诡异的现象，1912 年，魏格纳提出了一个堪称石破天惊的理论，那就是著名的大陆漂移说。大陆漂移说认为，地球上所有大陆原本是一块完整的大陆，被称为泛大陆；后来泛大陆分裂成了好几块，然后在地球自转的作用下漂移到了现在的位置。这样一来，非洲和南美洲的海岸线重合，以及这两个地方都发现中龙化石的问题，就迎刃而解了。

在科学史上，这是一个非常罕见的情况。一个气象学家，提出了一个地质学理论，来解释一个古生物学的问题。从某种意义上讲，这有点像是一个没有医师执照的人在非法行医。所以在长达 40 年的时间里，魏格纳一直被当成是一个民科（民间科学家），受到了地质学界和古生物学界的群嘲。

比如说，耶鲁大学古生物教授查理·舒克特就宣称：“一个门外汉把他掌握的

事实从一个学科移植到另一个学科，显然不会获得正确的结果。”而法国地质勘探局局长特迈也断言：“魏格纳的理论仅仅是一个漂亮的梦，当人们拥抱它时得到的只是一堆泡沫和一缕青烟。”

当然，在长达 40 年的铺天盖地的攻击和嘲笑声中，也有人支持魏格纳的理论，其中就包括哈佛大学地质学教授雷金纳德·戴利（图 2.11）。



图 2.11　雷金纳德·戴利

戴利是地质学界的大拿。他于 1912 年成为哈佛大学地理系的第一任系主任，并于 1932 年当选为美国地质学会的会长。虽然戴利也曾在公开场合管魏格纳叫“门外汉”，他还是觉得“门外汉”提出的大陆漂移说很有道理。

不止如此，戴利还尝试解决大陆漂移说最受人诟病的一个问题：为什么泛大陆会突然分裂成好几块？为此，在 20 世纪 40 年代，戴利提出了一个更加惊世骇俗的理论：泛大陆是被一颗巨大的小行星给撞碎的。

戴利认为，在很久以前，一颗巨大的小行星撞上了地球，把泛大陆撞成了好几块。此外，这次剧烈的碰撞也把地球表面（即地壳）的大量物质都撞到了太空中；这些物质后来重新聚合在一起，就形成了我们今天看到的月球。这就是月球起源的“撞击说”。

类似于大陆漂移说的遭遇，戴利的“撞击说”同样在天文学界被骂得狗血喷头。

在戴利提出“撞击说”之前，天文学界对于月球的起源，主要有两派观点。一派观点认为，月球与地球原本是同一团星云，由于受引力的作用而发生塌缩，然后分裂开来并分别形成月球和地球，这就是月球起源的“同源说”。另一派观点认为，月球原本是一个路过的天体，被地球的引力所捕获，然后变成一颗卫星并绕着地球旋转，这就是月球起源的“俘获说”。很长一段时间，这两派人都争吵不休。不过，他们也达成了一个共识：都强烈鄙视戴利提出的“撞击说”。

当然，到底哪种月球起源理论是正确的，还是要靠实验和观测来检验。事实上，这三种理论能给出三个截然不同的预言。“同源说”认为，月球和地球是由同一团星云塌缩而成，因此月球上的物质应该与地球上的物质完全相同。“俘获说”

认为，月球是一个外来的被地球引力捕获的天体，因此月球上的物质应该与地球上的物质完全不同。而“撞击说”认为，月球是由被小行星撞飞的地球地壳的物质重新聚合而成，因此月球上的物质应该与地球地壳的物质完全相同。换言之，如果能带回月球上的物质，并把它们与地球上的物质进行对比，就可以判断到底哪种月球起源理论是正确的。

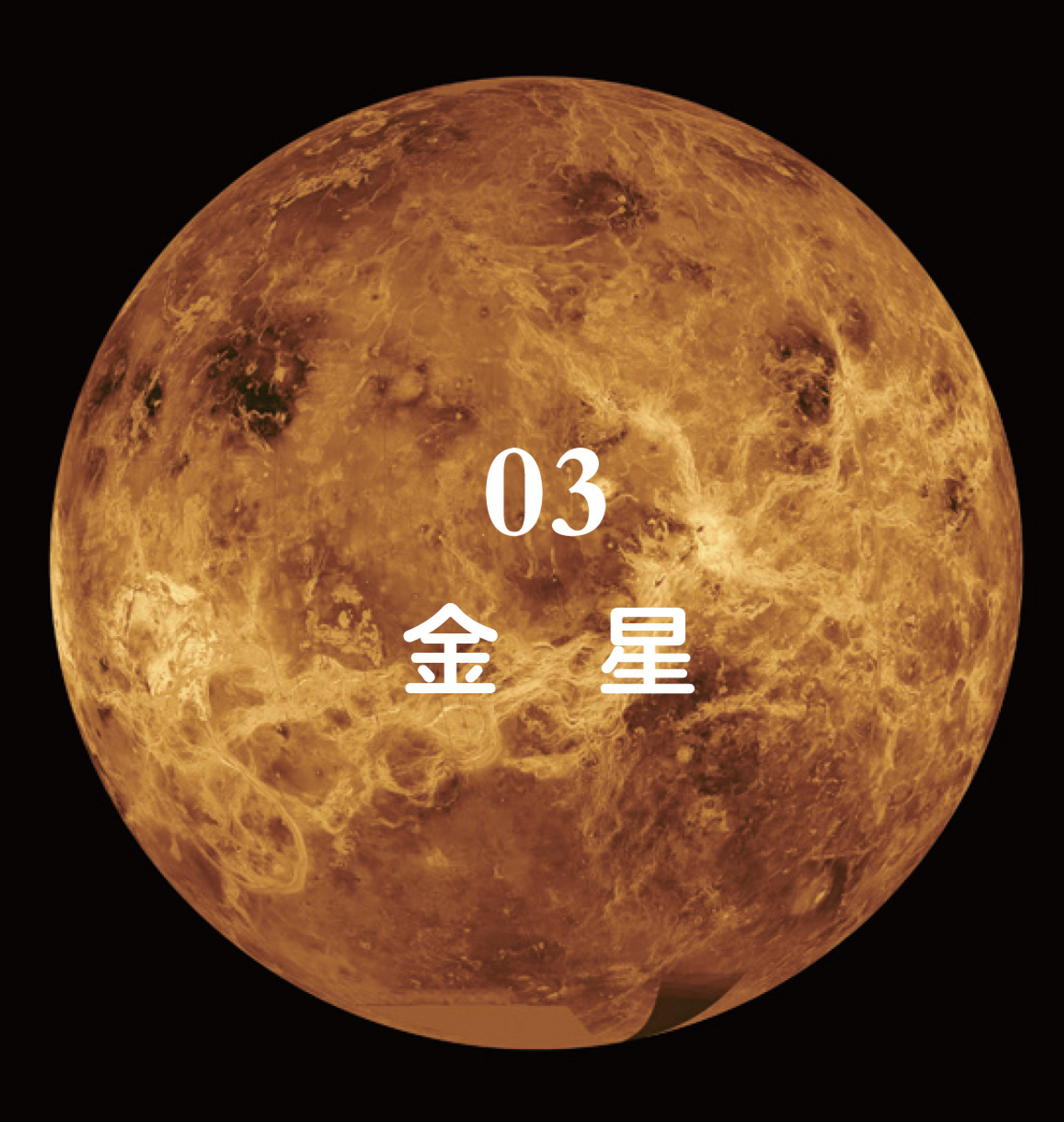
我们前面讲过，从 1969 年 7 月至 1972 年 12 月，阿波罗计划共把 12 名宇航员送上了月球。这些宇航员从月球上带回了大量的月球岩石样本。通过分析这些月球岩石样本，科学家们发现这些岩石样本的化学成分与地球地壳的物质完全相同。这样一来，在被嘲笑了 30 年之后，戴利的“撞击说”终于笑到了最后。

当然，戴利的原始理论还存在着不少细节上的问题。下面，我再以现代的眼光，详细地描述一下月球形成的全过程。大概在 45 亿年前，有一个火星大小、被称为“忒伊亚”（希腊神话中的一名泰坦，也是月球女神的母亲）的天体，撞上了被称为“盖亚”（希腊神话中的大地女神，也是众神之母）的原来的地球（图 2.12）。这次剧烈的撞击让“忒伊亚”和“盖亚”融合在了一起，从而形成了今天的地球。与此同时，这次撞击也把“盖亚”表面大量的物质撞到了太空中，形成了一个绕地球旋转的圆环；随着时间的推移，这个圆环中的物质重新聚合在一起，从而形成了今天的月球。



图 2.12　忒伊亚撞击盖亚

我们来做个总结。1912 年，魏格纳提出了著名的大陆漂移说。大陆漂移说认为，地球上所有大陆原本是一块完整的泛大陆，后来泛大陆分裂成了好几块，然后又漂移到了现在的位置。为了解释泛大陆为什么会分裂，戴利提出地球曾经遭遇一个巨大天体的撞击。这次碰撞把地球地壳的大量物质撞到了太空中；这些物质后来重新聚合在一起，就形成了今天的月球。这就是月球起源的“撞击说”。后来科学家通过分析阿波罗登月计划带回来的月球岩石样本，证明了“撞击说”的理论预言与实际观测吻合。这也让被学术界嘲笑了 30 年的“撞击说”笑到了最后。



03

金　星



3.1 金星盈亏如何敲响地心说的丧钟?

离开了月球，让我们前往这次太阳系之旅的第三站：金星（图 3.1）。

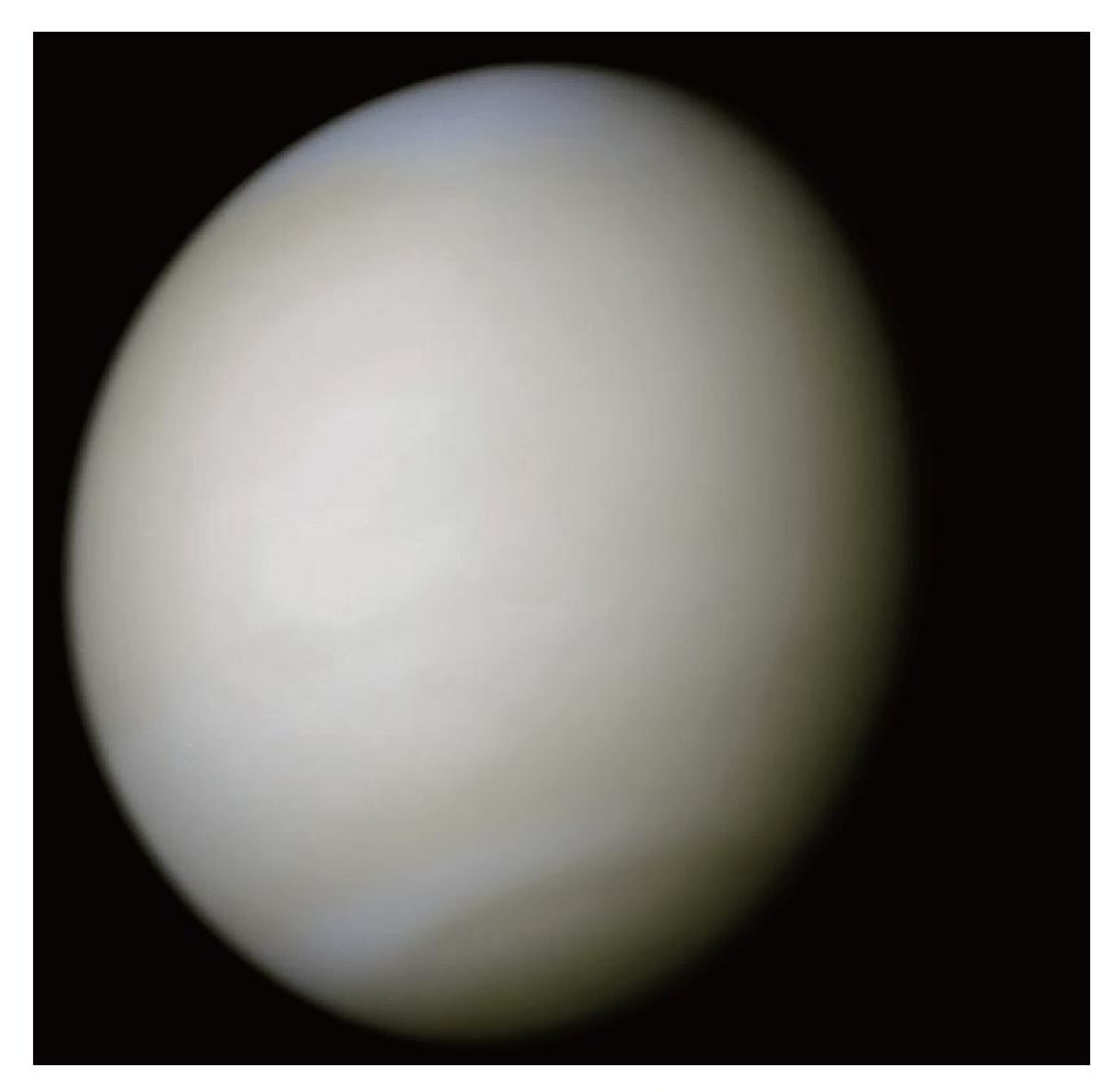


图 3.1　金星

质量：4.868×10^{24} 千克（地球质量的 81.5%）

体积：9.284×10^{20} 立方米（地球体积的 86.6%）

与太阳的平均距离：1.082×10^{8} 千米（日地距离的 72.3%）

金星是太阳系中离地球最近的行星，平均距离仅为 4150 万千米。因此，它也成了仅次于太阳和月球的天空中第三亮的天体。金星只要花 224.7 个地球日（一个地球日是 24 小时）就能绕太阳公转一圈。与此同时，金星的自转速度很慢，



图 3.2　托勒密

需要花 243 个地球日才能自转一圈。这让金星成了太阳系中极为罕见的一日（即金星日）比一年（即金星年）还要漫长的天体。

金星有一个相当有名的现象，叫金星盈亏。事实上，金星盈亏的发现是科学史上的一件举足轻重的大事，因为它直接促成了地心说的衰落和日心说的崛起。

为了说清楚这是怎么回事，我得先来讲讲地心说和日心说。

很早以前，人类就观察到所有的日月星辰都在周而复始地围绕地球旋转。所以，人类一直认为地球就是宇宙的中心。基于这种观念，公元 140 年，古罗马大天文学家托勒密（图 3.2）提出了一个著名的宇宙学模型，那就是地心说。

图 3.3 就描绘了地心说的宇宙图像。地球静止在宇宙的中心。而从内向外，依次是月球、水星、金星、太阳、火星、木星和土星。月球和太阳都在围绕着地球作圆周运动。其他五颗行星的运动状态比较复杂：首先，它们都在一个叫本轮的小圆上旋转；其次，本轮的圆心也在一个叫均轮的大圆上绕地球运动。换句话说，这五颗行星的运动轨迹是由本轮和均轮这两个圆周运动组合而成的，看起来很像是公园里的旋转咖啡杯。更外面，则是一个叫作恒星天的巨大球壳，其他的星星全都镶嵌在这个恒星天的内壁上。现代人一般把这个恒星天称为天球。

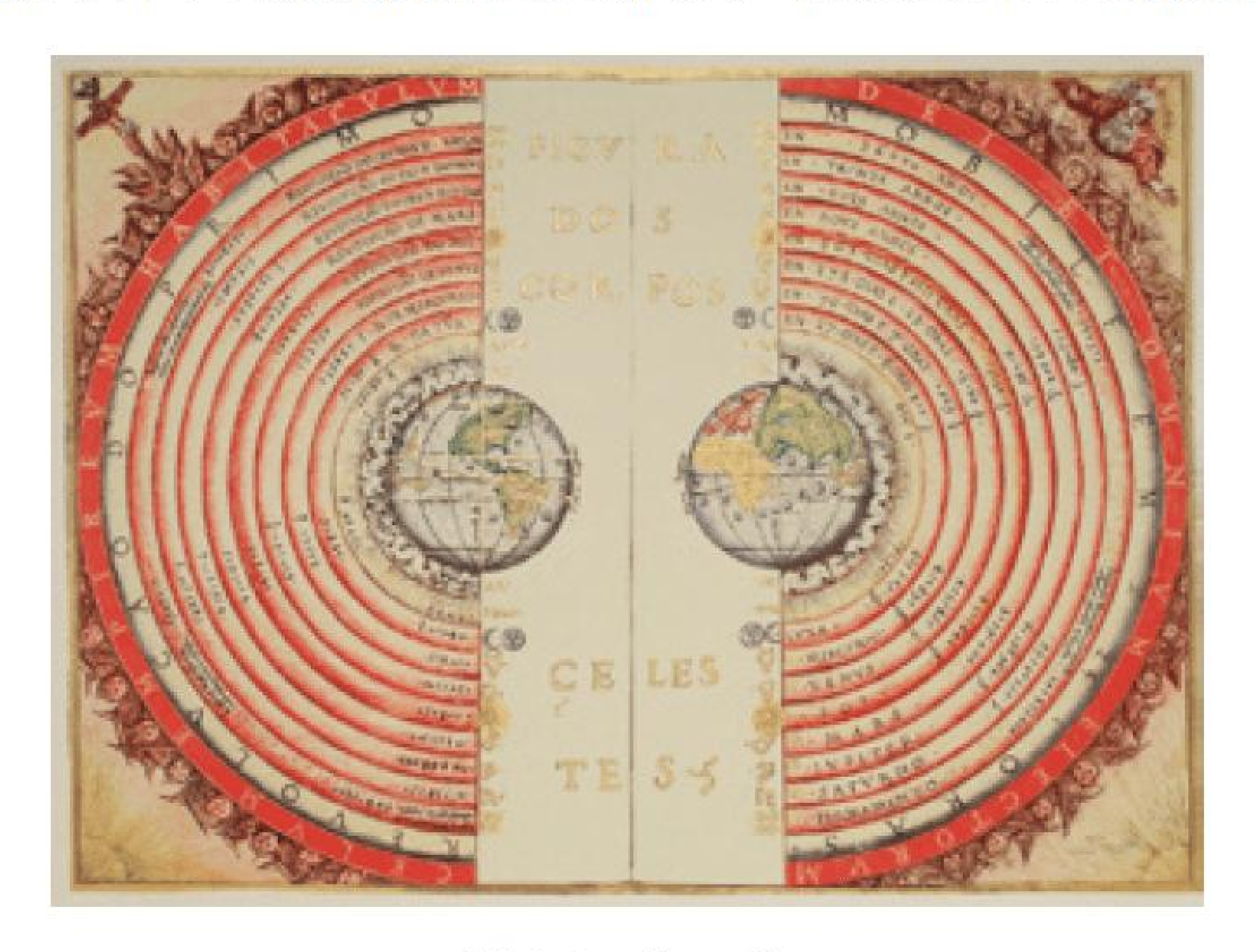


图 3.3　地心说

托勒密的地心说是一个比较完善的科学理论，能够很准确地描述太阳系中所有主要天体的运动轨迹。所以很多中小学教科书里都说，地心说被人们奉为经典，统治了学术界长达 1400 年之久。

但我要告诉你的是，这种说法并不算特别准确。地心说确实在罗马帝国和阿拉伯帝国被奉为经典。但在中世纪的欧洲，它却长期受到天主教会的冷落。直到公元 13 世纪，天主教里出了一个非常有名的神学家，叫托马斯·阿奎纳。他认为神学和自然科学并不矛盾，应该用“自然法则”来论证神学的正确性。为此，他仔细地研究了托勒密的地心说，并把地心说整合成了天主教神学体系的一部分。从那以后，地心说才真正地一统天下。

一直到 1543 年，地心说的统治地位才发生动摇。那一年，一个 70 岁高龄、即将不久于人世的老人，在他的一个学生的反复游说下，出版了一本书。相信你已经猜到了，那本书就是著名的《天体运行论》，而那个老人就是波兰大天文学家哥白尼（图 3.4）。

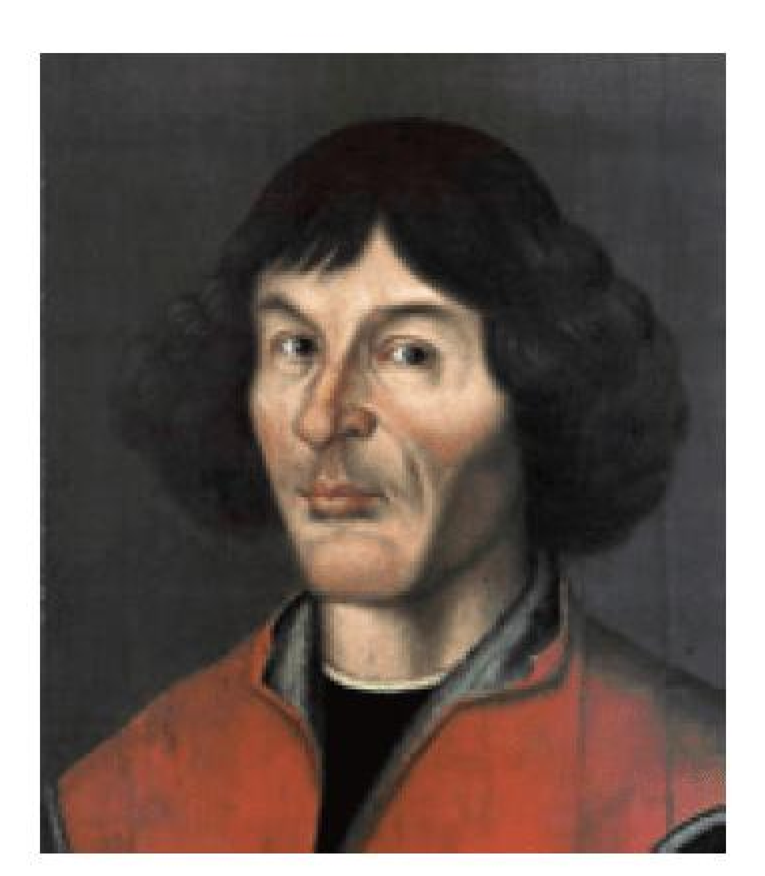


图 3.4 哥白尼

在这本书中，哥白尼提出了著名的日心说。图 3.5 就描绘了日心说的宇宙图像。这回，坐镇宇宙中心并保持静止不动的就变成了太阳。从内向外依次是水星、金星、地球、火星、木星和土星，它们都在围绕着太阳作圆周运动。更外面，则是与地心说一样的恒星天。显然，与又是本轮又是均轮的地心说相比，日心说的宇宙图像要简单很多。

其实早在 40 岁的时候，哥白尼就已经提出了日心说。但他一直都只在一个很小的圈子里宣传自己的理论，而始终不肯把它写书出版。这倒不难理解。当时地心说已经成为天主教神学体系的一部分，质疑它就相当于质疑整个天主教的神学体系。作为一名虔诚的天主教教士，哥白尼当然不愿与整个天主教会为敌。事实上，如果不是由于一名日心说的狂热粉丝，这个理论很可能会被哥白尼带进坟墓。

这个粉丝就是奥地利数学家格奥尔格·雷蒂库斯。此人写过一部关于三角函数的经典著作，其中率先给出了包括正弦、余弦、正切、余切、正割、余割

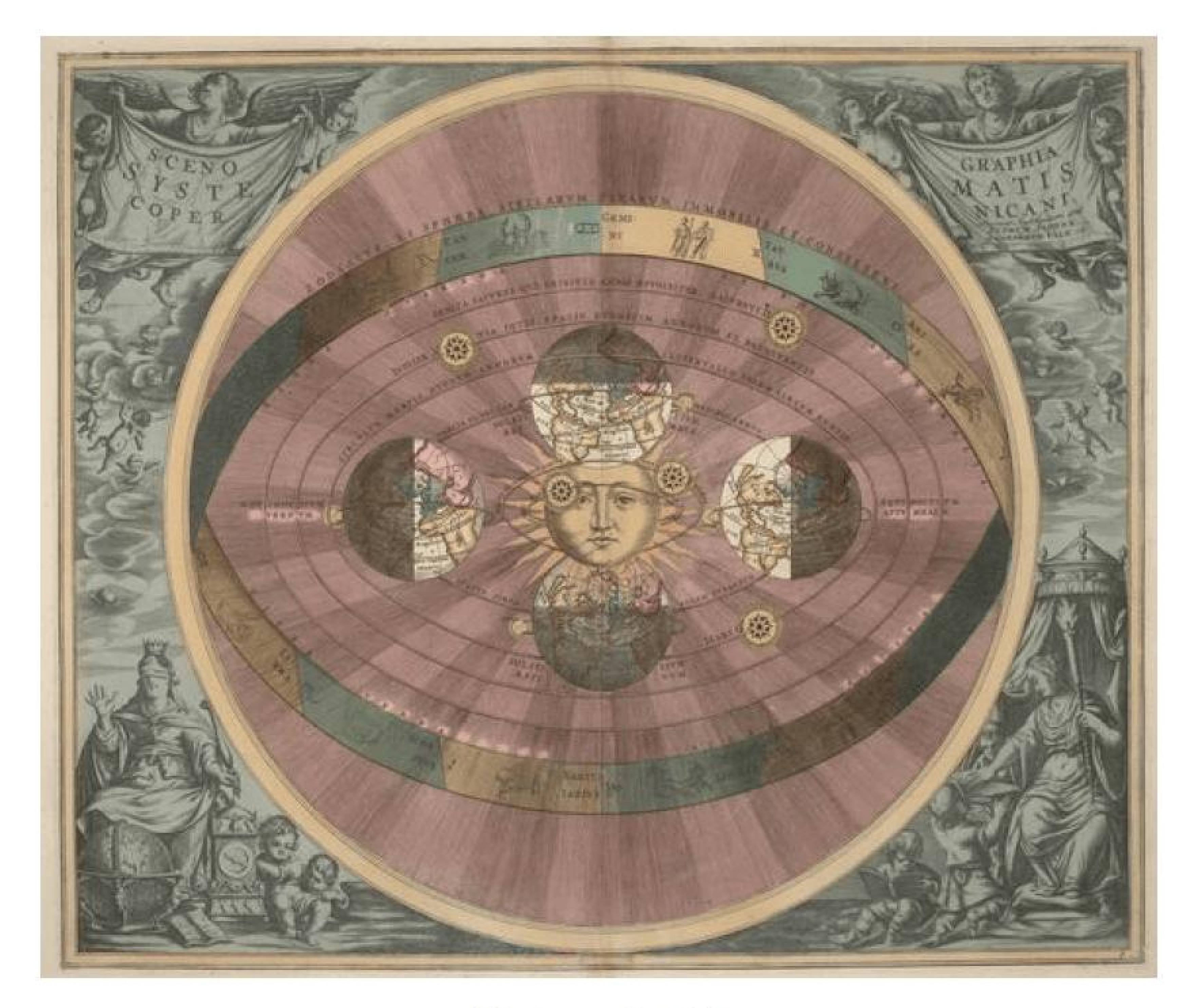


图 3.5　日心说

在内的六种三角函数表。公元 1539 年，他偶然了解到哥白尼的地心说，顿时觉得醍醐灌顶；为此他专门跑到波兰去拜见哥白尼，然后又成为哥白尼一生中唯一的学生。此后的两年，他多次游说哥白尼要把关于日心说的理论写成书，并正式出版，但哥白尼总是坚决反对。不过雷蒂库斯这个人很有韧劲，从来都不曾放弃。在软磨硬泡了整整两年以后，哥白尼终于招架不住，交出了《天体运行论》的全部手稿。

随后，雷蒂库斯就开始寻找愿意资助此书出版的土豪。一年后，他找到了一个这样的土豪，那是一个住在纽伦堡的出版商。这样一来，差点被哥白尼带进坟墓的《天体运行论》终于登上了历史的舞台。

由于《天体运行论》中包含大量的公式和图表，必须得有一个行家来做这本书的编辑。雷蒂库斯自己做了半年的编辑，但他突然被任命为莱比锡大学的教授，不得不中途离开。临走前，雷蒂库斯把编辑的工作委托给了一个朋友，那就是神学家奥西安德尔。

奥西安德尔一看这本书竟然要反对地心说，顿时觉得自己上了条贼船。为了

避免殃及自身，奥西安德尔干了一件今天的编辑就算吃了熊心豹子胆也不敢干的事情。他瞒着哥白尼和雷蒂库斯，伪造了一篇《天体运行论》的前言，宣称这部书“并不是一种科学的事实，而是一种富于戏剧性的幻想”。

一部划时代的科学巨著，就这样被歪曲成了一种奇技淫巧。

不过奥西安德尔的做法也不是完全没好处。《天体运行论》顺利通过了罗马教廷的审查，没有被列为禁书。

好了，现在有两个关于宇宙的理论：地心说和日心说。到底哪个对呢？大半个世纪，学术界一直对此争论不休，却一直争不出个所以然。直到 17 世纪初，一个科学巨人的横空出世，才打破了这个僵局。此人就是被后世称为“现代科学之父”的伽利略（图 3.6）。

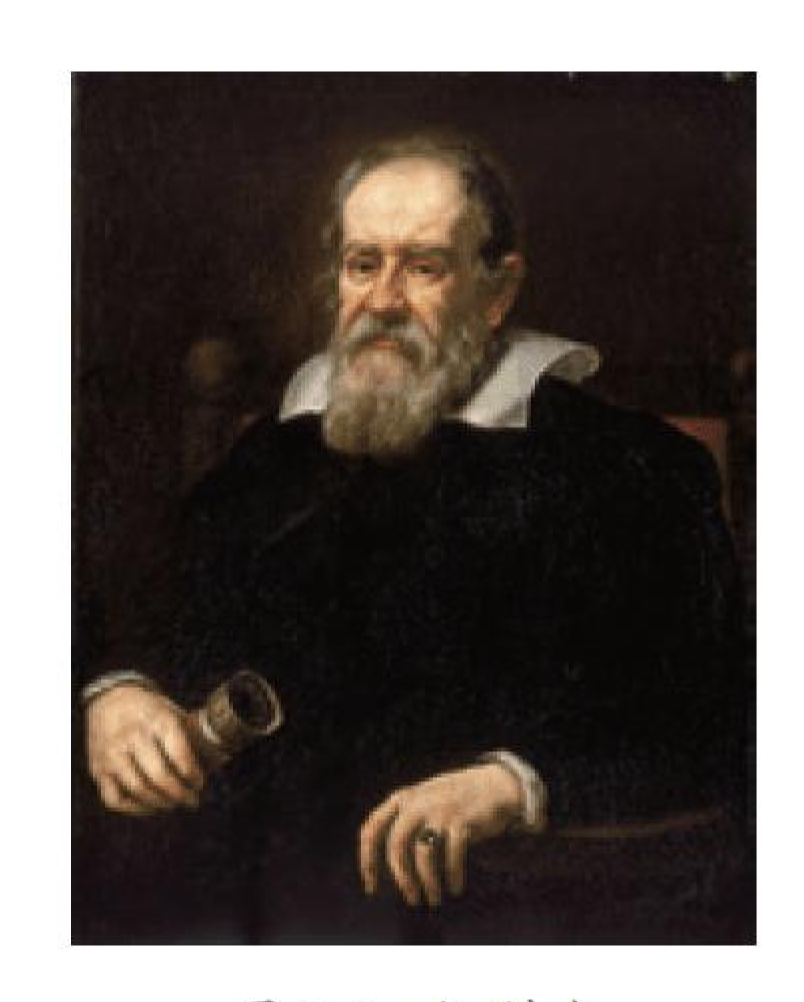


图 3.6　伽利略

公元 1564 年，伽利略出生在意大利的比萨市。他的父亲是当地的一个小有名气的音乐家。17 岁那年，伽利略考入了比萨大学；遵照父亲的意愿，他选择了学医。但没过多久，一个意外的事件彻底改变了伽利略的人生轨迹。

有一天，伽利略走进了比萨大学的一个教堂，注意到里面有一盏不断摆动的吊灯。通过与自己的脉搏跳动进行对比，伽利略发现无论这盏吊灯的摆动幅度是大是小，它摆回到最低点所花的时间都相同。换句话说，像这种不断摆动的物体，就可以用来计量时间。伽利略的这个发现被称为“单摆原理”。后来人们正是利用这一原理，造出了世界上第一台摆钟。

发现了单摆原理以后，伽利略就放弃了学医，而把主要精力都集中在了物理学的研究上。很快，他就在物理学界崭露头角。由于在力学领域的卓越贡献，伽利略在 25 岁就当上了比萨大学的教授。又过了三年，他被挖到了位于威尼斯的帕多瓦大学。正是在美丽的威尼斯，伽利略登上了自己学术生涯的巅峰。

公元 1608 年，一个荷兰眼镜店老板偶然发现用两块前后放置的镜片可以看清远处的物体，进而造出了人类历史上的第一架望远镜。这个消息传到了意大利，立刻引起了伽利略的浓厚兴趣。1609 年，伽利略制造了一个质量更好的望远镜，

能把远处的物体放大好几十倍。然后，他又做了一件意义非凡的事情：把望远镜指向了太空。这个举动后来让伽利略获得了一个荣誉称号：观测天文学之父。

在我看来，伽利略第一次用望远镜仰望太空的心情，应该和阿里巴巴第一次发现满山财宝的心情差不多。利用自己制造的望远镜，他发现了很多人类前所未见的景象。在这次的太阳系之旅中，伽利略的所有发现都将是我们讲述的重点。其中有一个发现，直接导致了地心说的衰落和日心说的崛起，这就是我们前面提到过的金星盈亏。

什么是金星盈亏呢？我们不妨用月球做一下类比。

众所周知，月球是有盈亏的。为什么月球会有盈亏呢？因为月球本身不发光，只能反射太阳光。由于月球一直在绕着地球旋转，它既可以跑到地球和太阳之间，也可以跑到地球的背后。如果月球跑到了地球和太阳之间，它就会把后面射来的太阳光挡住，进而让我们无法看到它，这就是月球的“亏”；如果月球跑到了地球的背后，它就可以完全地反射太阳光，进而让我们看到一轮最圆的明月，这就是月球的“盈”。

与月球不同的是，金星不可能跑到地球的背后。不过，它有可能跑到太阳的背后。如果金星跑到了地球和太阳之间，它就会挡住后面射来的太阳光，让我们看不到它，这就是金星的“亏”；如果它跑到太阳的背后，就可以完全地反射太阳光，让我们看到一个最圆最亮的金星，这就是金星的“盈”（图 3.7）。

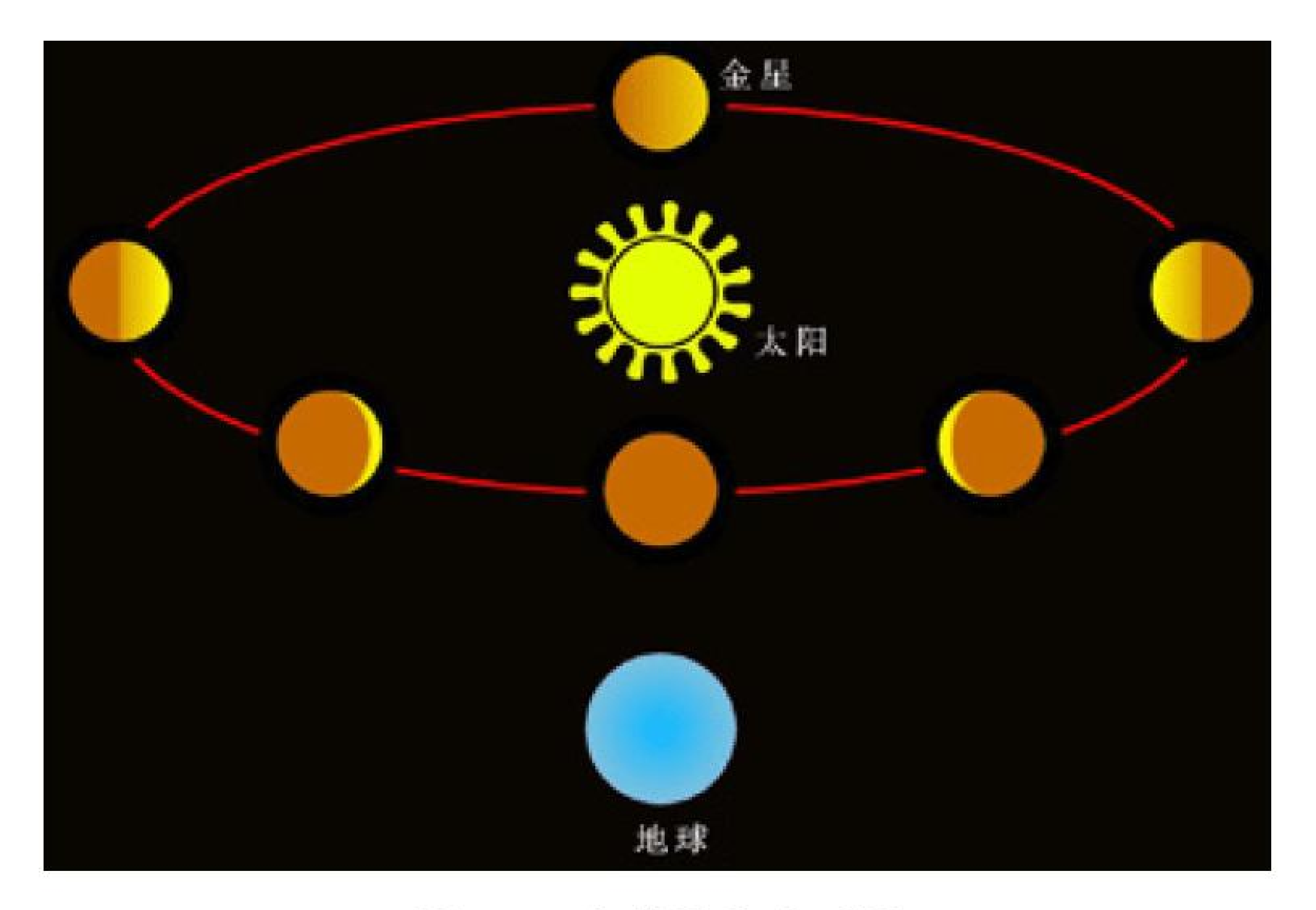


图 3.7　金星盈亏原理图

知道了金星盈亏的概念，我们就可以来讲讲如何判断地心说和日心说的对错了。问题的关键在于，金星到底是在绕地球还是在绕太阳旋转。

数千年的天文观测表明，如果以地球为顶点，分别向金星和太阳连线，所得到的角度最大也只有 48.5 度。换句话说，金星一直都在太阳周围活动。在地心说中，金星一直在绕着地球转；要想解释金星总在太阳周围活动的观测结果，金星和太阳就必须以差不多的角速度围绕地球旋转。在这种情况下，金星就只能一直处于地球和太阳中间，永远不可能出现“盈”的状态。而在日心说中，金星一直绕着太阳转，所以能自然而然地解释为什么金星总在太阳周围。更重要的是，在这种情况下，金星可以很轻易地跑到太阳的背后，从而出现“盈”的状态。因此，通过观察金星能否出现“盈”的状态，就可以确定它是否能绕到太阳的背后，进而判断地心说和日心说的对错。

在发明望远镜之前，人类只能用肉眼去仰望星空；这种观测条件，根本就不可能发现金星盈亏。公元 1610 年，伽利略用他自制的望远镜，真真切切地看到金星确实出现了“盈”的状态；在一封寄给朋友的信中，伽利略富有诗意地写道：“爱之母（金星）正在效仿辛西娅（月亮女神）的风姿。”同一年，他把这个发现写进了自己的传世名著《星际信使》，从而敲响了地心说的丧钟。

我们来做个总结。过去很长一段时间，人类一直信奉托勒密的地心说；在地心说中，地球静止在宇宙的中心，其他的所有天体都在围绕地球旋转。公元 1543 年，哥白尼在雷蒂库斯的反复游说下，出版了《天体运行论》。在这本书中，哥白尼提出了日心说，认为真正静止在宇宙中心的是太阳，而其他的所有天体，包括地球在内，都在围绕太阳旋转。大半个世纪，学术界一直无法确定到底哪个理论是对的。直到公元 1609 年，伽利略用他自制的望远镜发现了金星盈亏，从而证明了金星的的确确是在绕太阳旋转。这个划时代的伟大发现，敲响了地心说的丧钟。

除了金星盈亏，还有一个与金星息息相关的观测，也在天文学的历史上留下了浓墨重彩的一笔。那就是金星凌日。

3.2 金星凌日如何测出地球与太阳间的距离？

我先来介绍一下什么是金星凌日。为了便于理解，我还是用月球来进行类比。众所周知，月球有时会跑到地球和太阳的中间，挡住太阳光射向地球的路线，这就是所谓的日食。同样的道理，金星有时也可以跑到地球和太阳的中间。这时在地球上观测，就可以看到一个小黑点在太阳表面缓慢地穿行。一般来说，这个小黑点要花几个小时才能通过太阳的表面。这个现象就是所谓的"金星凌日"(图 3.8)。

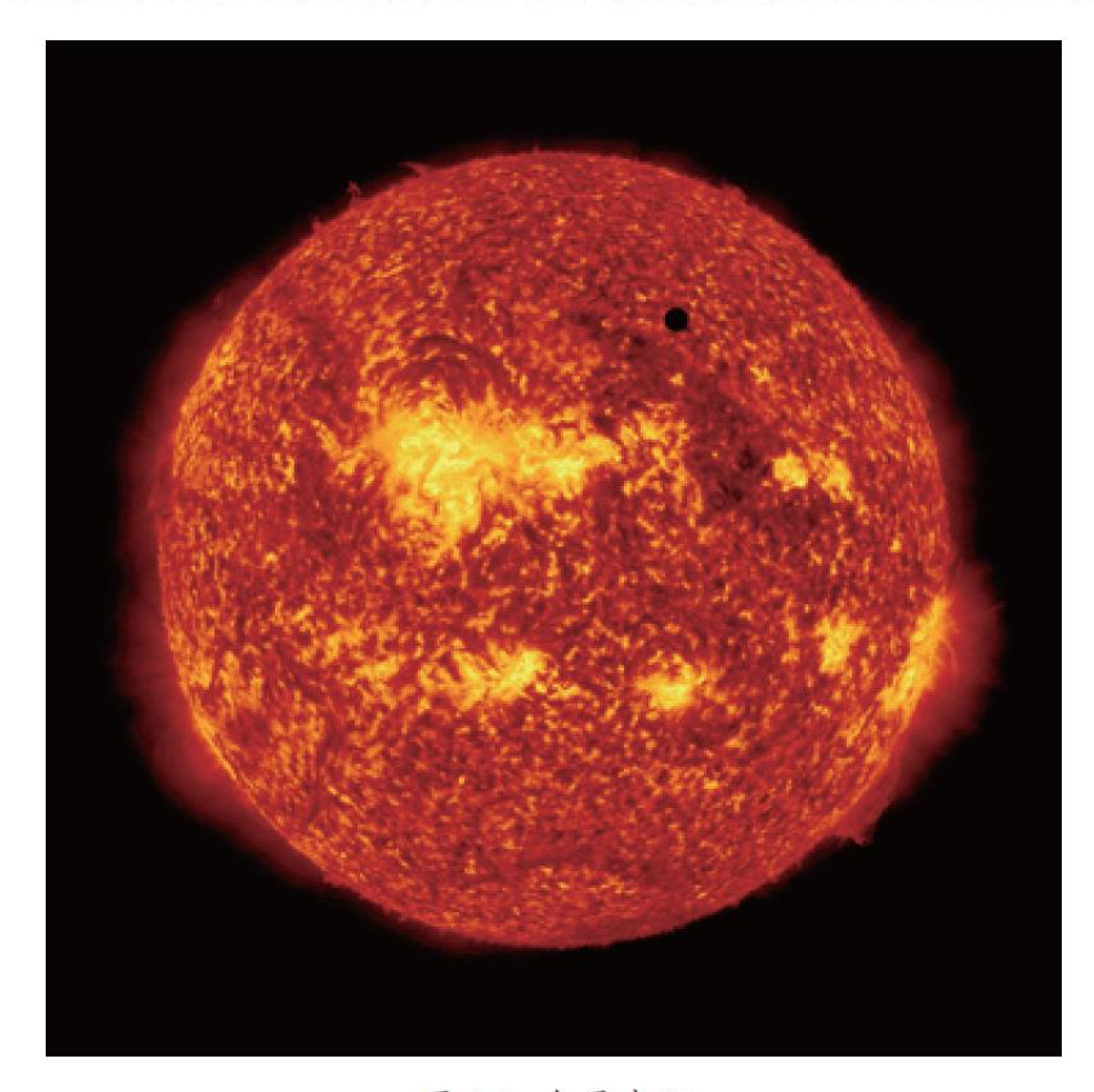


图 3.8 金星凌日

世界上第一个观测到金星凌日的人是英国天文学家杰雷米亚·霍罗克斯(图 3.9)。他的人生充满了神秘色彩。


图 3.9 雷米亚·霍罗克斯

1618 年，霍罗克斯出生在英国利物浦附近的托克斯特思公园镇的一个钟表商之家。他天资聪颖，14 岁就考上了剑桥大学。但三年后，由于某种未知的原因（有人说是经济困难，也有人说是考试挂科），他从剑桥大学退了学。

退学后的霍罗克斯搬到了利物浦附近的一个叫霍奥莱的小村庄，成为当地一个教堂的牧师。业余时间，他全都用来研究天文学。1639 年，在仔细研究了开普勒的《鲁道夫星表》以后，霍罗克斯发现当年 12 月 4 日的下午 15:00 左右，会发生一次金星凌日。他赶快把这个发现告诉了自己的一个住在曼彻斯特名叫克拉布特里的朋友。

1639 年 12 月 4 日，霍罗克斯和克拉布特里就分别在利物浦和曼彻斯特观测太阳。不过，那天的天气很不好，两地都是阴天的状态。幸运的是，下午 15:15，太阳从利物浦的云层里露出了头，霍罗克斯惊喜地看到了一个小黑点从太阳表面穿行而过。而到了下午 15:35，曼彻斯特的云层也消散了，克拉布特里也看到了自己期待已久的天体。这是人类历史上第一次观测到金星凌日。

预言并发现了金星凌日，让霍罗克斯在天文学界声名鹊起。按理说，他的前途本应一片光明。但 1641 年 1 月 3 日，霍罗克斯突然去世了。没有人知道他的死因，也没有人知道他被葬在了哪里。年仅 22 岁的霍罗克斯，就这样走完了自己充满神秘色彩的一生。

又过了 75 年，有个人发表了一篇论文，让金星凌日一跃成为整个天文学界都关注的焦点。此人就是英国著名天文学家埃德蒙多·哈雷（图 3.10）。



图 3.10 埃德蒙多·哈雷

我们前面已经提到过哈雷。正是他，一手促成了有史以来最伟大的学术著作，也就是《自然哲学的数学原理》的出版。事实上，哈雷本身也是一个百科全书式的科学巨人。19 岁那年，本科还没毕业的哈雷就成为首任英国皇家天文学家约翰·弗兰斯蒂德的助手，并在南大西洋的一个小岛上建立了南

半球的第一个天文台。22 岁那年，他绘制出了标有 341 颗恒星精确位置的世界上的第一张南天星表，并因此而当选为英国皇家学院的院士。26 岁的时候，他算出了著名的哈雷彗星的轨道，并预言它每隔 76 年就会回归一次。除了天文学以外，哈雷也在其他的科学领域做出了很多开创性的贡献。比如说，他制作了世界上第一张气象图，发明了世界上第一个潜水钟，还写了世界上第一篇关于人寿保险的论文。

1716 年，哈雷发表了一篇里程碑式的论文。在这篇论文中，他指出如果能精确地观测金星凌日，就可以测出地球与太阳之间的距离，即所谓的日地距离。

图 3.11 就是用金星凌日来测量日地距离的原理图。

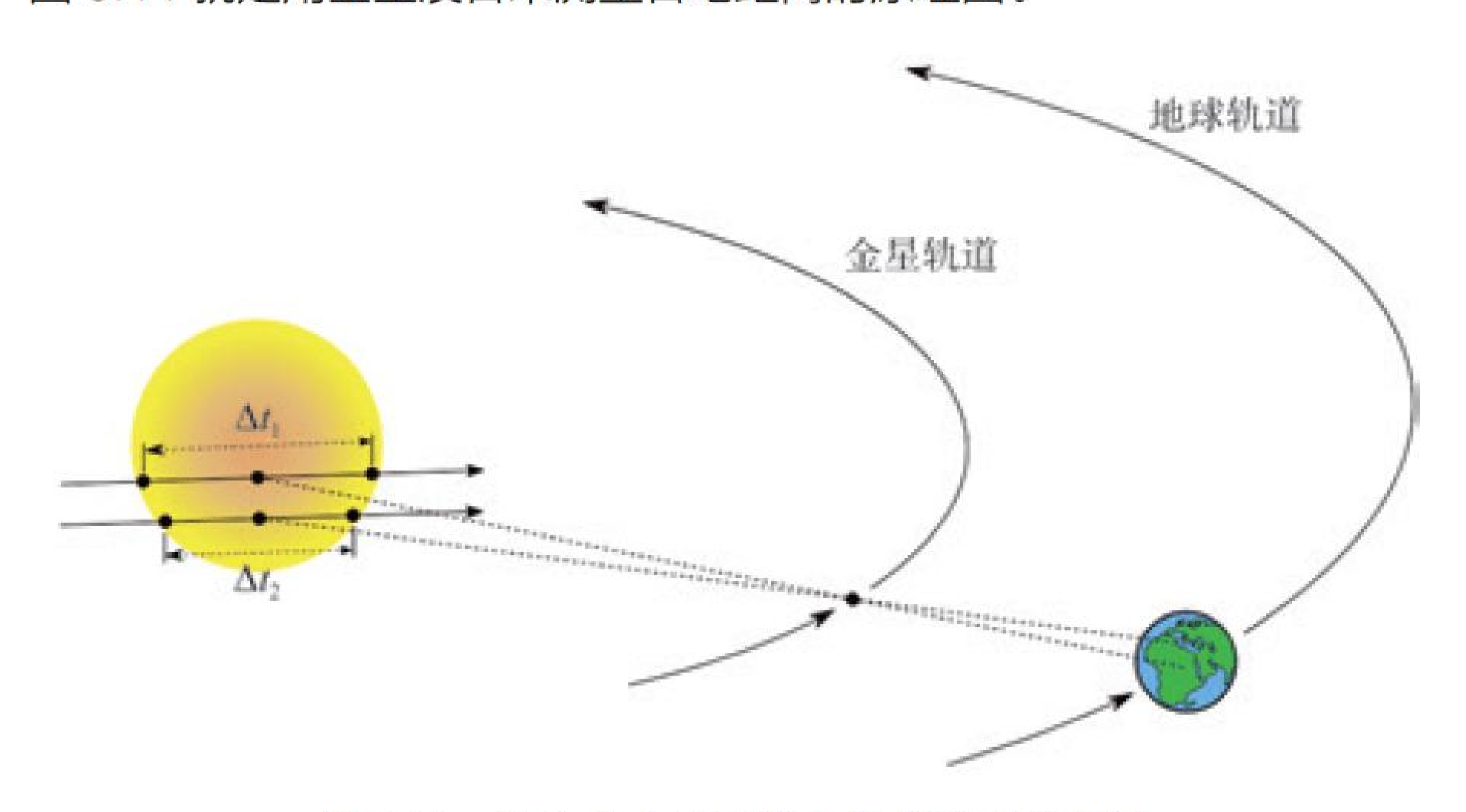


图 3.11 用金星凌日测量日地距离的原理图

哈雷指出，可以在地球上的两个经度相同而纬度相差较大的地点同时观测金星凌日。从图中很容易看到，在两地看到的金星凌日的轨迹不同，从而导致在两地测出的金星凌日的持续时间出现一定的差异。通过比较两者之间的时间差，能算出金星与这两个观测地点所构成的等腰三角形的顶角。初中的几何知识告诉我们，一段圆弧的长度等于圆的半径乘以这段圆弧所对应的角度。因此，用两地之间的距离除以这个顶角，就能得到地球与金星之间的距离。知道了地球与金星间的距离，再利用开普勒第三定律（即行星运动周期的平方与其椭圆轨道长半轴的立方成正比），就可以算出日地距离了。

可能你会觉得奇怪了：“不就是测个日地距离吗？怎么会成为整个天文学界关注的焦点？”答案是，日地距离是宇宙学测距的基石。一旦知道了日地距离，就

可以利用三角视差的方法来测量遥远天体的距离了。

为了解释什么是三角视差，我们不妨来做一个小实验。伸出一只手指，放在靠近鼻子的地方，然后轮流闭上左眼或右眼，每次都只用一只眼睛来看它。你会发现手指相对于背景的位置发生了明显的偏移。这是由于你前后两次观察它的位置发生了改变。这个由于观察者自身位置改变而导致被观察物体位置发生偏移的现象，就是视差。现在把手指放在比较远的地方，重复这个实验，你会发现手指的位置偏移变小了。这说明被观察物体的视差越小，它离我们的距离就越远。

顺便多说一句。电影院里放的 3D 电影之所以能呈现出立体感，就是利用了视差的原理。

有了视差的概念，我们就可以讲讲如何用三角视差法来测量遥远天体的距离了。图 3.12 就是三角视差法的原理图。

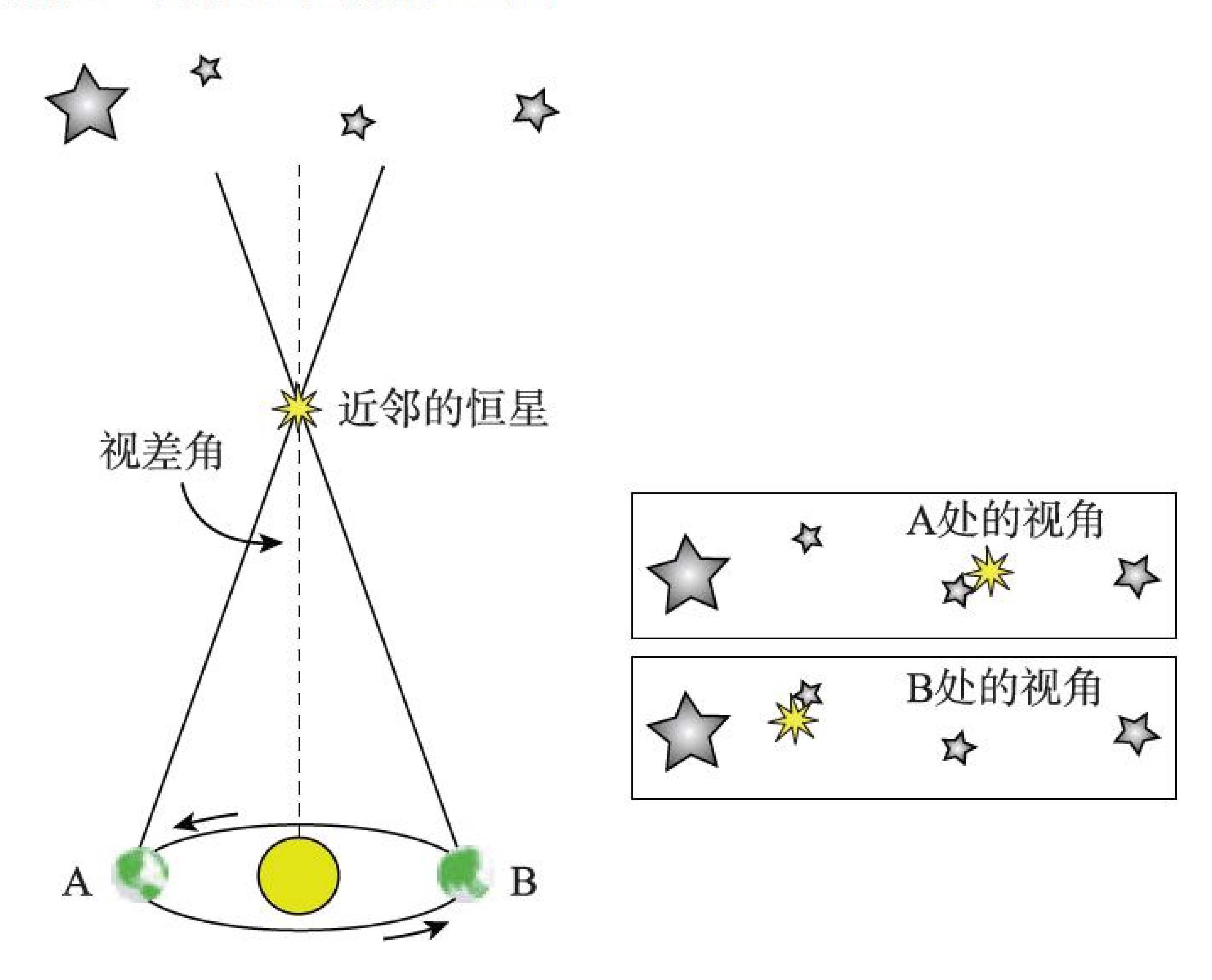


图 3.12　用三角视差法测量距离的原理图

众所周知，地球每年会绕太阳转一圈。如果地球在某个时刻运动到图中的 A 点，那么半年之后它就会到达离 A 点最远的 B 点。现在把 A 点和 B 点当成一个人的左眼和右眼，然后分别在这两个地方观察一颗远处的星星。很明显，这颗星星在遥远天幕上的位置会发生改变。利用这个位置的改变，能算出此星星与 AB 两点所构成的等腰三角形的顶角，也就是所谓的周年视差角。这样一来，只要知道了日地距离，就能知道 AB 两点的间距；而用 AB 两点的间距除以星星的周年视差角，就可以算出我们到这颗星星的距离。

事实上，一直到 20 世纪之前，三角视差法都是人类所知的测量太阳系外天体距离的唯一方法。即使是到了今天，它也是其他宇宙学距离测量方法的基石。因此，哈雷的论文一经发表，立刻成为整个天文学界关注的焦点。

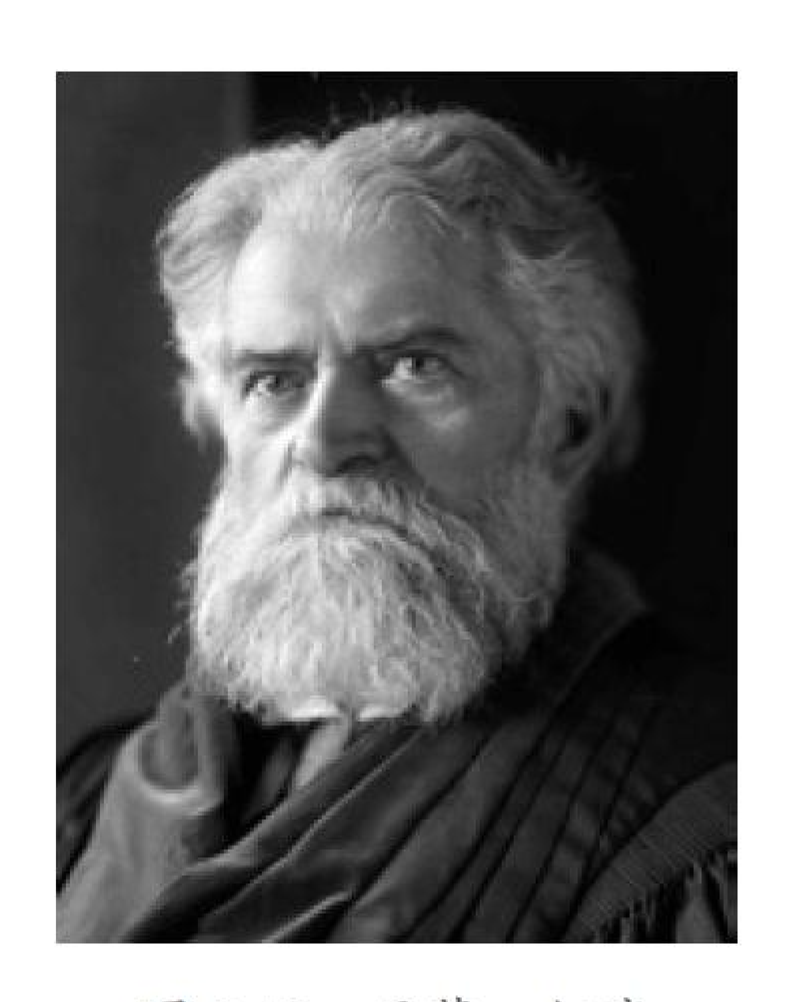
但问题在于，金星凌日是一种极端罕见的天文现象。它总是结对出现，两次金星凌日之间相距 8 年；然后就得再等上一百多年，才能看到下一对的金星凌日。所以，哈雷没能亲眼看到金星凌日，一直到他死后的 20 年，也就是 1761 年，天文学家才终于等到了用金星凌日来测量日地距离的机会。

这或许是人类历史上第一次大规模的国际科研合作。欧洲各国的科学家奔赴全球 100 多个观测点，来观测金星凌日。受限于当时的摄像技术，没有人能把日地距离测得特别准确。其中最倒霉的人，非法国天文学家纪尧姆・勒让蒂尔莫属。

提前一年的时间，勒让蒂尔坐船从法国出发，想要前往印度观测这次的金星凌日现象。万万没想到，快到印度的时候，印度的宗主国英国居然和法国打起仗来。英国人把勒让蒂尔当成是间谍，直接关进了监狱。1761 年的金星凌日观测就这么泡汤了。

勒让蒂尔没有气馁。被释放后，他还是继续前往印度，然后花了 8 年的时间在当地建了一个天文台。第二次金星凌日发生在 1769 年 6 月 4 日。当天早上醒来的时候，勒让蒂尔很开心地看到了一个艳阳天。但就在金星凌日即将发生之时，突然冒出了一朵乌云，把太阳遮得严严实实。勒让蒂尔 8 年的心血再次付诸东流。

勒让蒂尔的厄运依然没有结束。在坐上回国的轮船之前，他突然生了一场大病，有一年的时间都卧床不起。好不容易病好上了船，又在返程的途中遇到了一场台风，差一点就葬身鱼腹。过了整整 11 年，勒让蒂尔才回到法国，然后又遭遇了一个新的打击：他的亲戚早已宣布了他的死亡，并且瓜分了他所有的财产。


图 3.13　西蒙・纽康

前面说过，由于摄像技术的局限，18 世纪的这两次对金星凌日的观测，都没能测出真实的日地距离。直到一百多年后，才有人测出了日地距离的准确值，此人就是美国天文学家西蒙・纽康（图 3.13）。

很多人知道西蒙・纽康，都是由于他写的那本

畅销科普书《通俗天文学》。事实上，他也是著名物理学家阿尔伯特·迈克尔逊的伯乐，后者是历史上第一位获得诺贝尔物理学奖的美国人。有趣的是，纽康也摆过一个很大的乌龙：他写过一篇论文，宣称人类永远不可能造出能承载一个人质量的飞行器。当然，后来莱特兄弟造出了飞机，狠狠地打了他的脸。

1882 年，西蒙·纽康做了一件相当大手笔的事情。他组织了八支探险队，来观测当年的金星凌日。正是通过这次观测，他准确地测出了日地距离：1.4959 亿千米。这个 100 多年前测出的数值，与今天的测量结果几乎没有差异。

我们来做个总结。1639 年，霍罗克斯最早观测到了金星凌日。所谓的金星凌日，就是金星跑到地球和太阳的中间，让地球上的观测者看到一个小黑点在太阳表面穿行的现象。1716 年，哈雷发表了一篇里程碑式的论文，指出如果在地球上的两个经度相同而纬度相差较大的地点同时观测金星凌日，就可以测出日地距离。1882 年，西蒙·纽康组织了八支探险队来观测当年的金星凌日，并测出了日地距离约为 1.5 亿千米。这个发现奠定了宇宙学距离测量的基石。

我已经介绍了两个与金星有关，并在科学史留下浓墨重彩一笔的天文现象：金星盈亏和金星凌日。不过这两个天文现象都是在地球上观测到的。接下来，让我带你去游览一下金星本身。

3.3 为什么金星会变成一个地狱般的地方？

在古代中国，金星有好几个名字。黎明时分，它会出现在东边的地平线上，所以被人们称为“启明星”；而黄昏时分，它又会出现在西边的余晖中，所以又被人们称为“长庚星”。此外，它也经常被称为“太白星”，即道教中玉皇大帝的信使。而在西方，人们管金星叫维纳斯，也就是罗马神话中主管爱与美的女神。在很多神话故事中，金星都被描绘成了一个特别浪漫而美丽的地方（图 3.14）。

事实上，有很长一段时间金星一直被视为地球的姐妹行星，因为它们确实有很多相似之处。比如说，金星的体积约为地球体积的 85.5%，而金星质量约为地球质量的 81.5%；换言之，两者的大小和质量都相差无几。因此，很多人都幻想过说不定有朝一日人类能移民金星。



图 3.14　恐怖的金星

但到了 20 世纪下半叶，移民金星的幻想被彻底打破。而打破它的，正是我们前面提到过的美苏太空争霸。

前面说过，苏联一度在太空争霸中独占鳌头：第一颗人造卫星、第一位宇航员以及第一个月球探测器，都是苏联送上天的。事实上，苏联也是最早尝试探测金星的国家。

20 世纪 60 年代初，苏联启动了著名的“金星计划”；在超过 20 年的时间里，这个计划总共发射了 26 个探测器来探测金星。

1961 年 2 月 4 日，苏联人首次尝试发射金星探测器。但不幸的是，这个探测器根本没能飞离地球。为了面子，苏联人没把这个探测器纳入“金星计划”，而对外宣称他们只是发射了一颗人造地球卫星。8 天之后，也就是 2 月 12 日，苏联人又开始了一次新的尝试。这一回，他们终于把一个探测器送出了地球，这就是“金星 1 号”。但“金星 1 号”发射 7 天后就与地球失联，所以这次任务还是以失败告终。

此后数年，苏联人一直厄运不断。他们先后发射了 12 个金星探测器，不是飞不出地球，就是飞出不久就失联，结果全都以失败告终。顺便多说一句。凡是飞不出地球的探测器，都没被纳入“金星计划”。

整整 6 年后，苏联人的付出才获得回报。1967 年发射的“金星 4 号”，于当年 10 月 18 日成功进入金星轨道，并且发回了金星大气层的数据。这也让它成为历史上第一个进入其他行星大气层的人造物体。有趣的是，苏联人当时还吹牛，说“金星 4 号”也成功抵达了金星的表面。但不久之后，美国“水手 5 号”传回来的观测数据表明，金星大气压是地球大气压的近百倍，能在“金星 4 号”登陆前就把它压得粉碎。苏联人不得不尴尬地撤回他们之前的声明。

三年后，苏联又取得了重大的突破。1970 年发射的“金星 7 号”，于当年 12 月 15 日穿越了金星大气层，成功到达了金星的表面。这也让它成为历史上第一个在其他行星表面登陆的人造物体。此后，它还与地球通信了 23 分钟，并且把火星地表的数据成功传回了地球。后来的 10 多年间，苏联发射的探测器曾先后十次登陆金星表面（图 3.15 就是这些探测器在金星表面的登陆地点），并获取了大量关于金星大气、地表和地壳的一手资料。

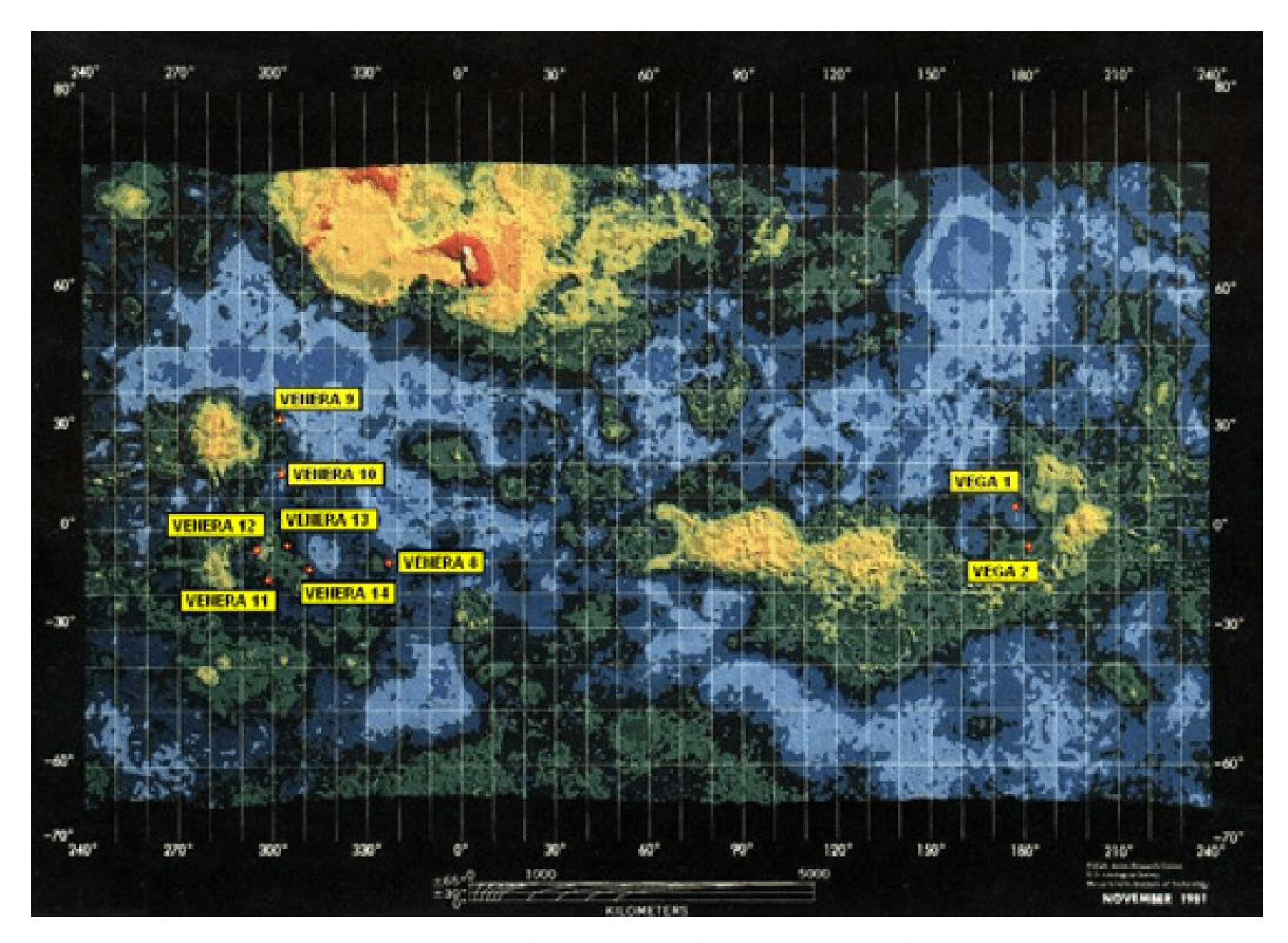


图 3.15　苏联探测器在金星表面的登陆点

可能你会问了:“为什么探索金星的全是苏联人啊? 美国人怎么什么都没干呢? ”事实上,美国人也没闲着。与苏联的“金星计划”同时,美国也启动了一个“水手计划”。这个太空计划总共发射了 10 个探测器。但不像苏联人一直钟情于金星,“水手计划”发射的绝大多数探测器都去了火星。

当然，美国人也没有完全忘记金星。1989 年，美国发射了“麦哲伦号”金星探测器。它配备了一套非常先进的雷达探测系统，能穿透厚厚的云层直接拍摄金星表面的影像。从 1990 年 8 月 10 日到 1994 年 12 月 12 日，“麦哲伦号”一直在环绕金星飞行，并把它拍到的金星照片不断传回地球（图 3.16）；把这些照片拼在一起，科学家就获得了历史上第一张完整的金星地图。

正是这些为了太空争霸而发射的金星探测器，让人类意识到金星原来是一个如同地狱般恐怖的地方。

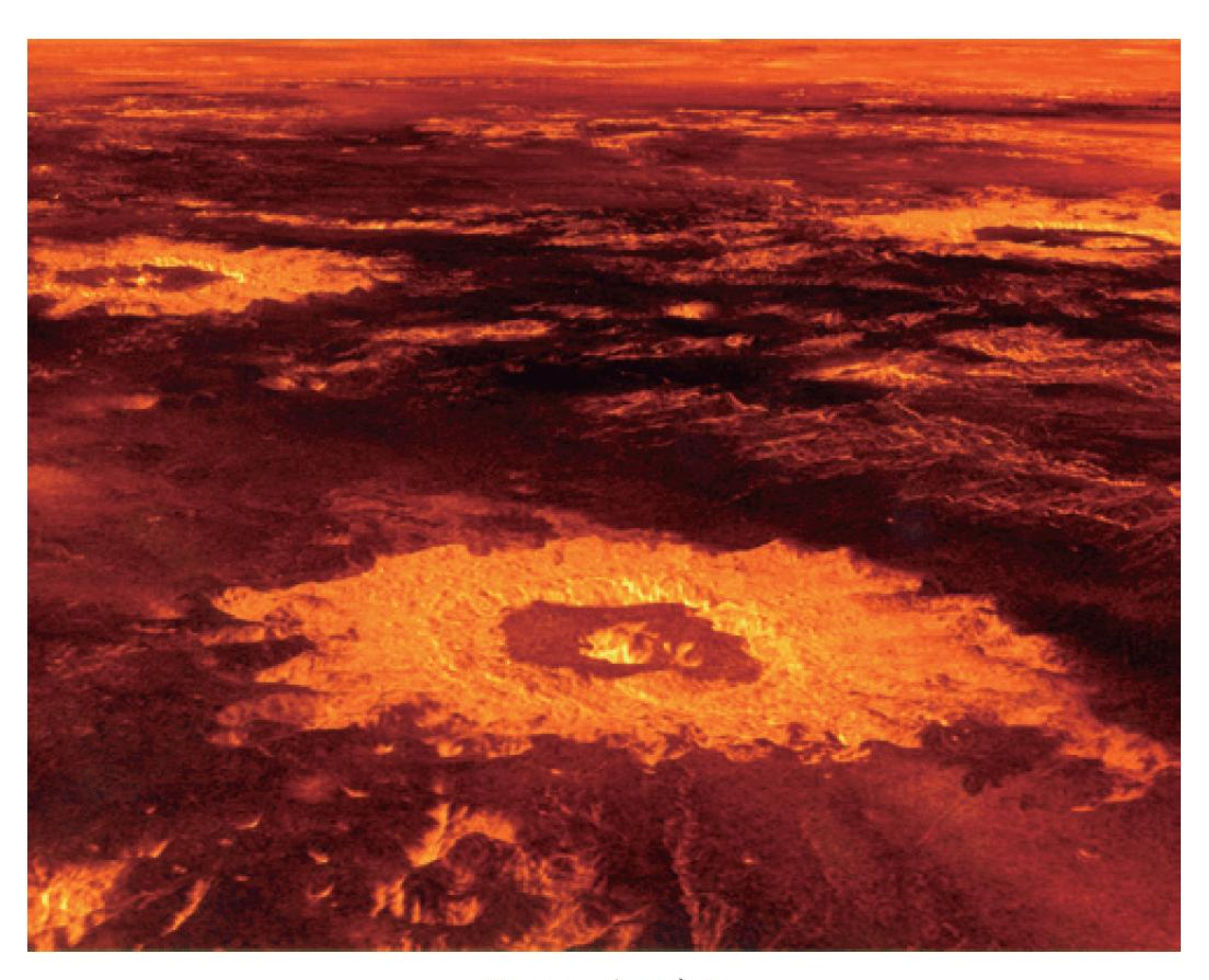


图 3.16 金星表面

金星最恐怖的是以下三点：①高温。金星表面的平均温度约为 460℃，是整个太阳系中最炽热的行星；换句话说，人类要是到了金星表面，立刻会被烤熟。②高压。金星表面的大气压是地球大气压的 92 倍，相当于在 1 平方米的面积上放上一个 950 吨的重物。这是什么概念呢？大致相当于在一个普通人的头顶放上一辆坦克。③强腐蚀性。金星上的火山喷发把大量的硫化物送上了高空，进而形成了大片的硫酸云层；因此，金星上会时不时地下一场规模浩大的硫酸雨。由于这三大危险，金星就变成了一个名副其实的地狱。

可能你要问了："一个明明和地球颇为相似的行星，为什么会变成这种宛如地狱的样子？"最早揭开这个秘密的人，是美国著名天文学家、科普作家卡尔·萨根。

我对萨根的工作量一直感到困惑。一般的大学教授，一生中大概能发表 100 篇学术论文。而萨根，总共发表了 600 多篇论文。除此以外，他还写过 20 多本书（包括一本后来拍成好莱坞大片的科幻小说），做过一个在全世界范围内拥有 5

亿观众的电视科普节目，并长期担当一家学术期刊的主编。更匪夷所思的是，尽管拥有这么惊人的工作量，萨根去世的时候才只有 62 岁。

这些工作让萨根获得了很多荣誉，包括两次普利策奖（新闻界的最高奖）、两次艾美奖（电视界的最高奖）和一次雨果奖（科幻界的最高奖）。当然，萨根在科学领域也贡献颇丰。举个例子。早在苏联的“金星 7 号”登陆金星之前，萨根就已经揭开了金星变成地狱之谜。而造成这一悲剧的罪魁祸首，就是大家在日常生活中经常听到的“温室效应”。

为了便于理解，我先来讲讲地球上的温室效应。

众所周知，任何具有温度的物体都会向外辐射电磁波，这就是所谓的热辐射。物体的温度越高，热辐射的总能量就越高，则短波长的电磁波所占的比重就越高。反过来，物体的温度越低，热辐射的总能量就越低，则长波长的电磁波所占的比重就越高。很明显，太阳表面温度远远高于地球表面温度。因此，太阳辐射的平均波长就较短，而地球辐射的平均波长就较长。

地球大气层中包含一类特殊的气体（其中包括二氧化碳、水蒸气、甲烷和臭氧），称为温室气体。其最大的特点是，对短波长的电磁波几乎没什么影响，但对长波长的电磁波有很强的吸收能力。我们前面说过，太阳辐射的平均波长较短，不会受温室气体的阻碍，能顺利到达地球表面。而地球辐射的平均波长较长，会有相当大的一部分被温室气体拦截下来，进而使大气层升温。大气层又会辐射电磁波，其中一部分进入了太空，而另一部分则返回了地球表面。这意味着，地球辐射的部分能量会受到温室气体的拦截而返回地球表面。很明显，温室气体的存在能让行星表面的温度升高，这就是所谓的温室效应（图 3.17）。

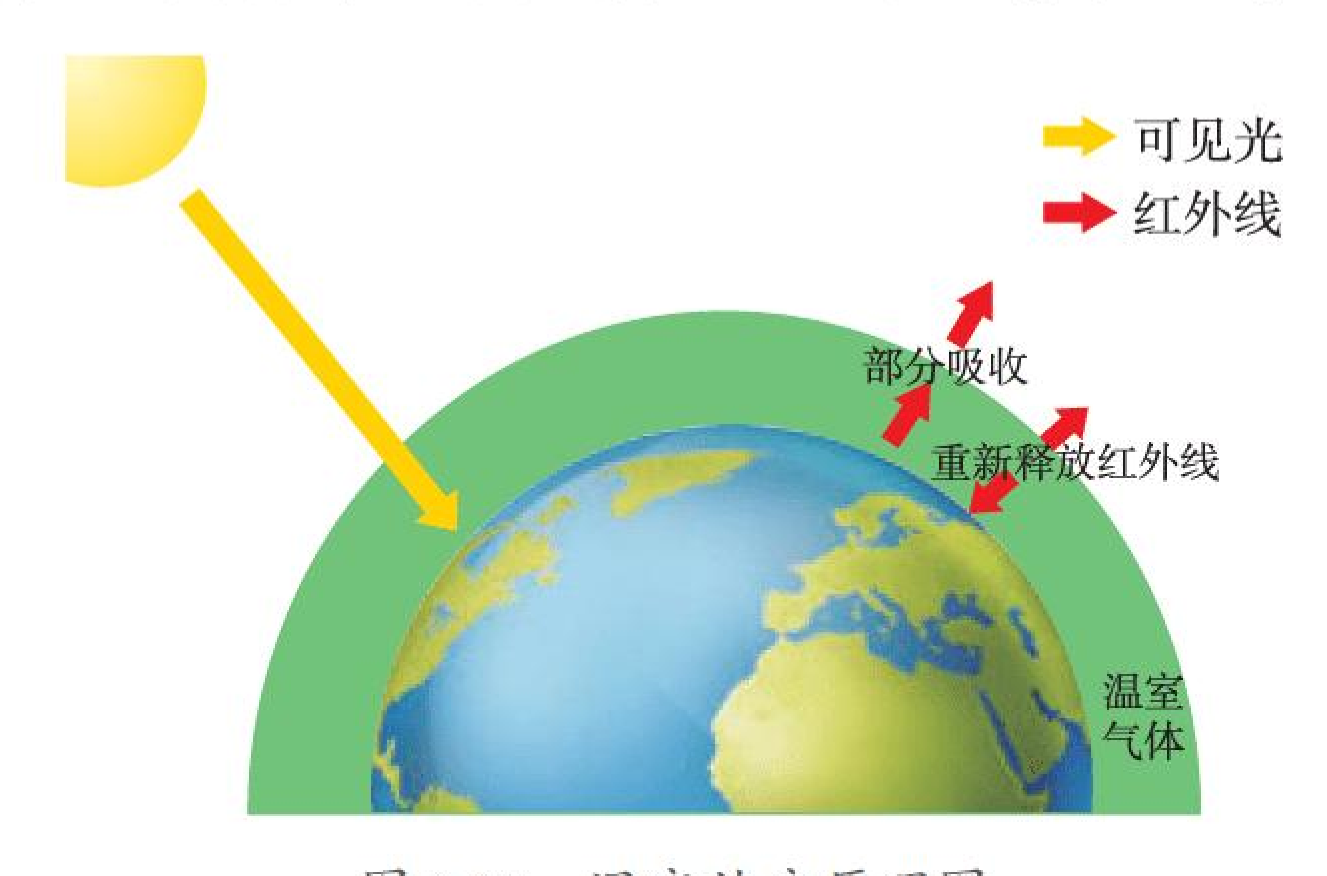


图 3.17　温室效应原理图

我们在游览地球的时候就说过，温室效应是地球能成为生命绿洲的一个非常重要的因素。目前地球表面的年平均温度是 14℃。如果没有温室效应，这个温度会骤降为 −18℃。很明显，如果地球表面的平均温度骤降 32℃的话，地球将变成一个很难生存的地方。

但反过来，如果温室效应大幅增强，甚至最后失控的话，那就会变成一个更加可怕的灾难。1961 年，萨根在《科学》杂志上发表了一篇论文，率先指出温室效应失控是把金星变成恐怖地狱的罪魁祸首。

前面说过，温室气体中包括二氧化碳。在地球大气中，二氧化碳的含量在 0.03% ~ 0.04% 之间。而在金星大气中，二氧化碳的含量高达 96%！这么高的二氧化碳含量，让温室效应彻底失控；相应地，金星表面辐射的电磁波几乎全都被金星大气所拦截。正因为如此，金星表面的平均温度飙升到了 460℃，变得比离太阳最近的水星还要高。

这也能解释为什么金星会拥有如此之高的大气压。大气温度高，就说明大气分子有很快的运动速度。因此，金星大气中那些密度较小的气体（如水蒸气），就拥有足够快的逃逸速度来脱离金星引力的束缚。只有那些密度较大的气体，才会被金星引力继续束缚在它的周围。由于只剩下密度大的气体，金星的大气压自然就大幅增大了。

正是由于失控的温室效应大幅升高了金星的温度和大气压，才把金星变成了一个如此恐怖的地方。

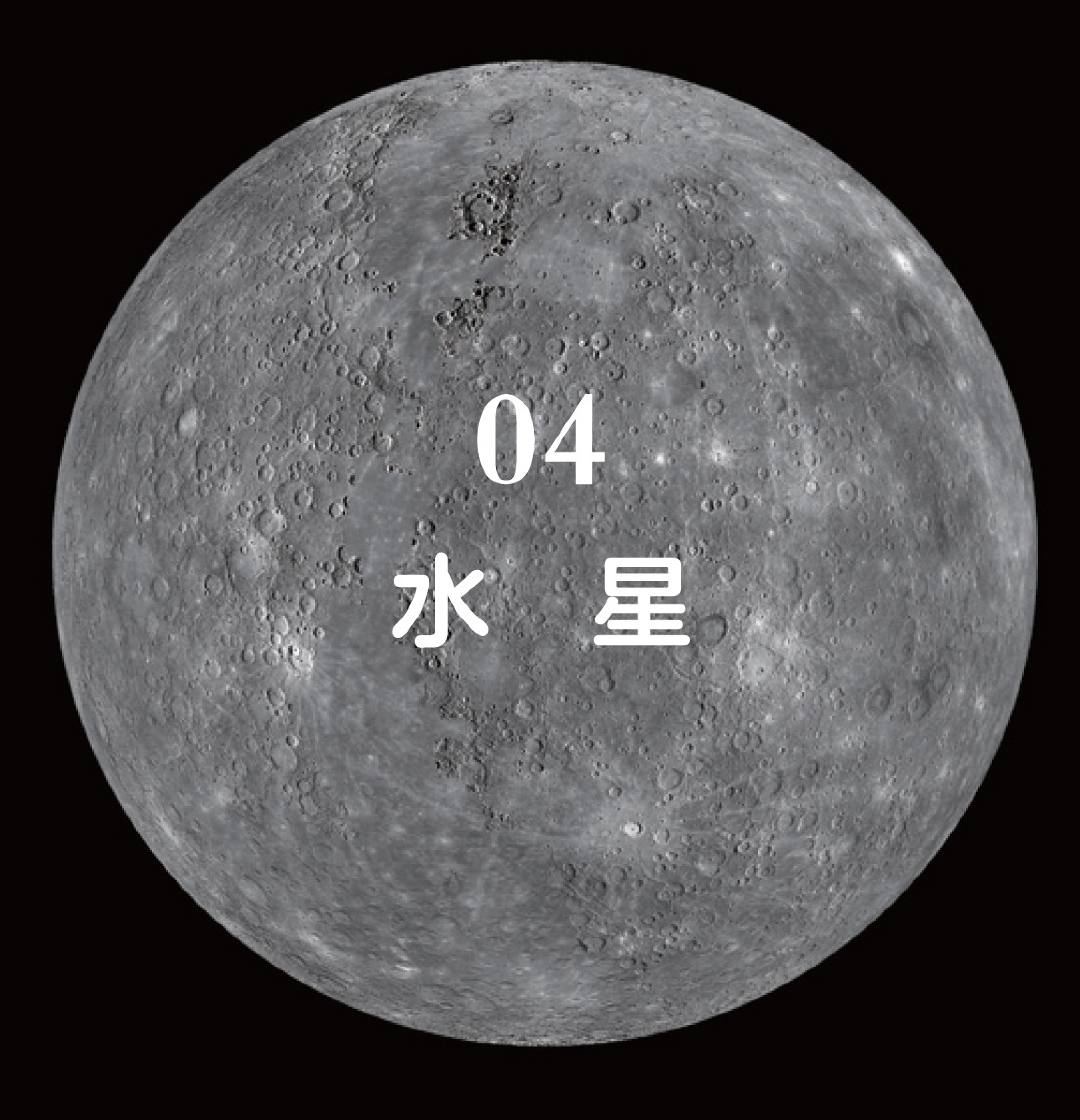
我们来做个总结。20 世纪 60 年代初，苏联启动了著名的“金星计划”，在 20 多年的时间里发射了 26 个金星探测器，并把 10 个探测器送上了金星的表面。这些探测器发现，金星其实是一个地表温度高达 460℃、表面气压 92 倍于地球大气压，还时不时会下一场硫酸雨的恐怖地狱。卡尔・萨根最早指出，这是由于金星大气中二氧化碳含量高达 96%，进而导致温室效应彻底失控；而正是由于失控的温室效应所导致的高温和高压，才把金星变成了一个如地狱般恐怖的地方。

最后再说几句。过去一百年间，地球大气中的二氧化碳含量也有了显著的上升。一方面，人类燃烧了大量的化石燃料（如煤炭、石油和天然气），从而向空气中直接排放了大量的二氧化碳。另一方面，人类又大面积地砍伐森林，从而大幅度地减少了能通过光合作用吸收二氧化碳的绿色植被的数量。而进入 21 世纪

以后，全球变暖的进程明显加快。举个例子。全球变暖导致冰川融化，海洋面积占地球总表面积的比例，已经从 20 世纪末的 71% 变成了现在的 75%。

人类必须要保护地球，这已经是一个老生常谈的话题。但说实话，我并不认为地球需要人类的保护。因为她曾历经五次生物大灭绝，而一直岿然不动。真正需要保护的，其实是人类自己。

04 水　星





4.1 水星逆行为何会推动地心说的变革？

离开了金星，让我们前往这次太阳系之旅的第四站：水星（图 4.1）。

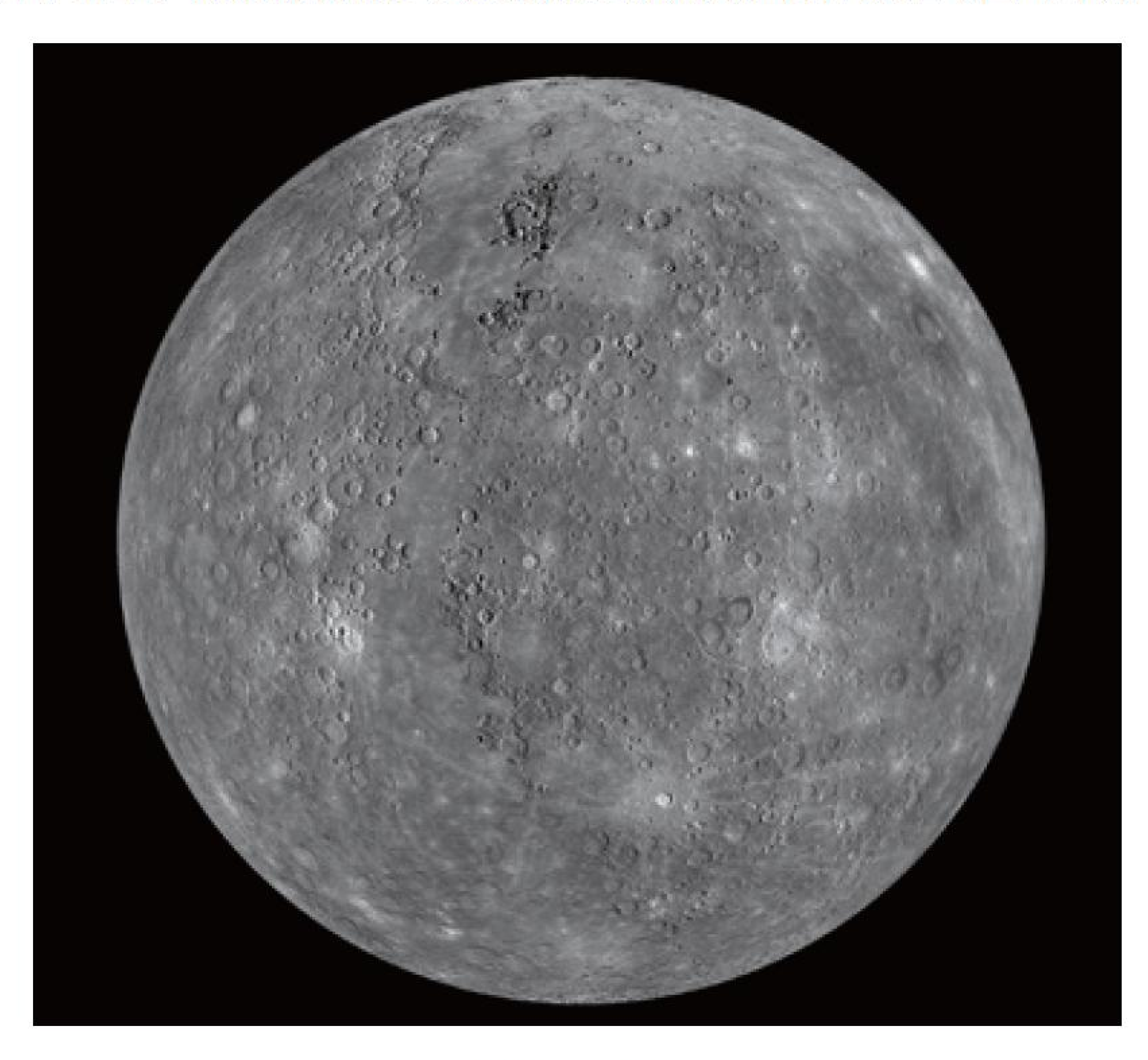


图 4.1　水星

质量：3.301×10^{23} 千克（地球质量的 5.5%）

体积：6.803×10^{19} 立方米（地球体积的 5.6%）

与太阳的平均距离：5.791×10^{7} 千米（日地距离的 38.7%）

水星是太阳系中最小的行星，体积只有地球的 5.6%，质量也只有地球的 5.5%。它也是离太阳最近的行星，只要花 88 个地球日就能绕太阳公转一圈。此外，水星也是全太阳系地表温差最大的行星。它面向太阳的一面，温度高达 430℃；而背对太阳的一面，温度则低至−170℃。换句话说，水星地表的温差能达到惊

人的 600℃。

估计很多人一提到水星，首先想到的名词就是“水逆”。

所谓的“水逆”，其实是水星逆行的简称。一年中，大概会出现三四次水逆。占星学认为，在此期间人往往会“诸事不顺”；有些占星师还宣称，这是一段“不适合做重大决定”的危险时期。

那水星逆行到底是怎么回事呢？下面，我就来给你讲一讲。为了便于理解，让我先从相对比较简单的黄道面说起。

从古至今，地球一直在同一个平面内围绕太阳公转。这个地球绕太阳公转的轨道平面，就是所谓的黄道面。事实上，太阳系内的所有行星，当然也包括水星，基本上全在这个黄道面内绕太阳公转。此外，这些行星的运动方向也完全相同，都是自西向东沿逆时针的方向绕太阳旋转。

前面讲地心说的时候，我们已经提到了天球；这是一个假想的、以地球为球心且半径无限大的球面，可以覆盖整个天空。很明显，把黄道面无限延伸，最终会与天球相交成一个圆（就是图 4.2 中那个红色的大圆）。这个圆，就是所谓的黄道。在地球上看来，黄道就是太阳在天球上运动的轨迹。

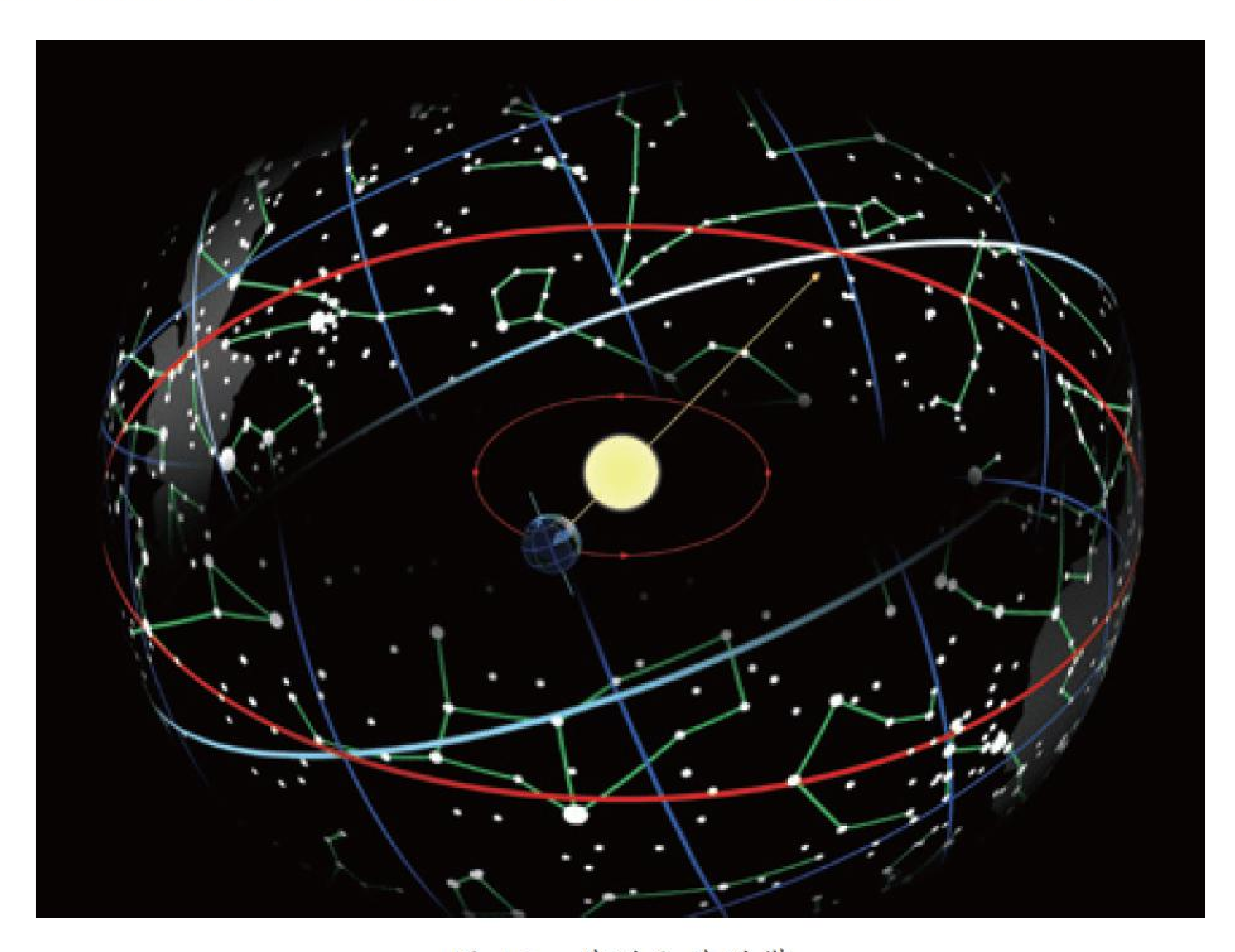


图 4.2 黄道和黄道带

早在公元前 5 世纪，古巴比伦人就提出了黄道带的概念。所谓的黄道带，就是黄道南北两侧各增加 8 度的圆环区域。在地球上看来，太阳系内的所有行星都在这个黄道带内运动。此外，以太阳在春分时的位置为起点，可以把黄道带均匀地划分成 12 个 30 度的区域，分别对应白羊座、金牛座、双子座、巨蟹座、狮子座、处女座、天秤座、天蝎座、人马座、摩羯座、水瓶座和双鱼座，这就是黄道十二宫（图 4.3）。

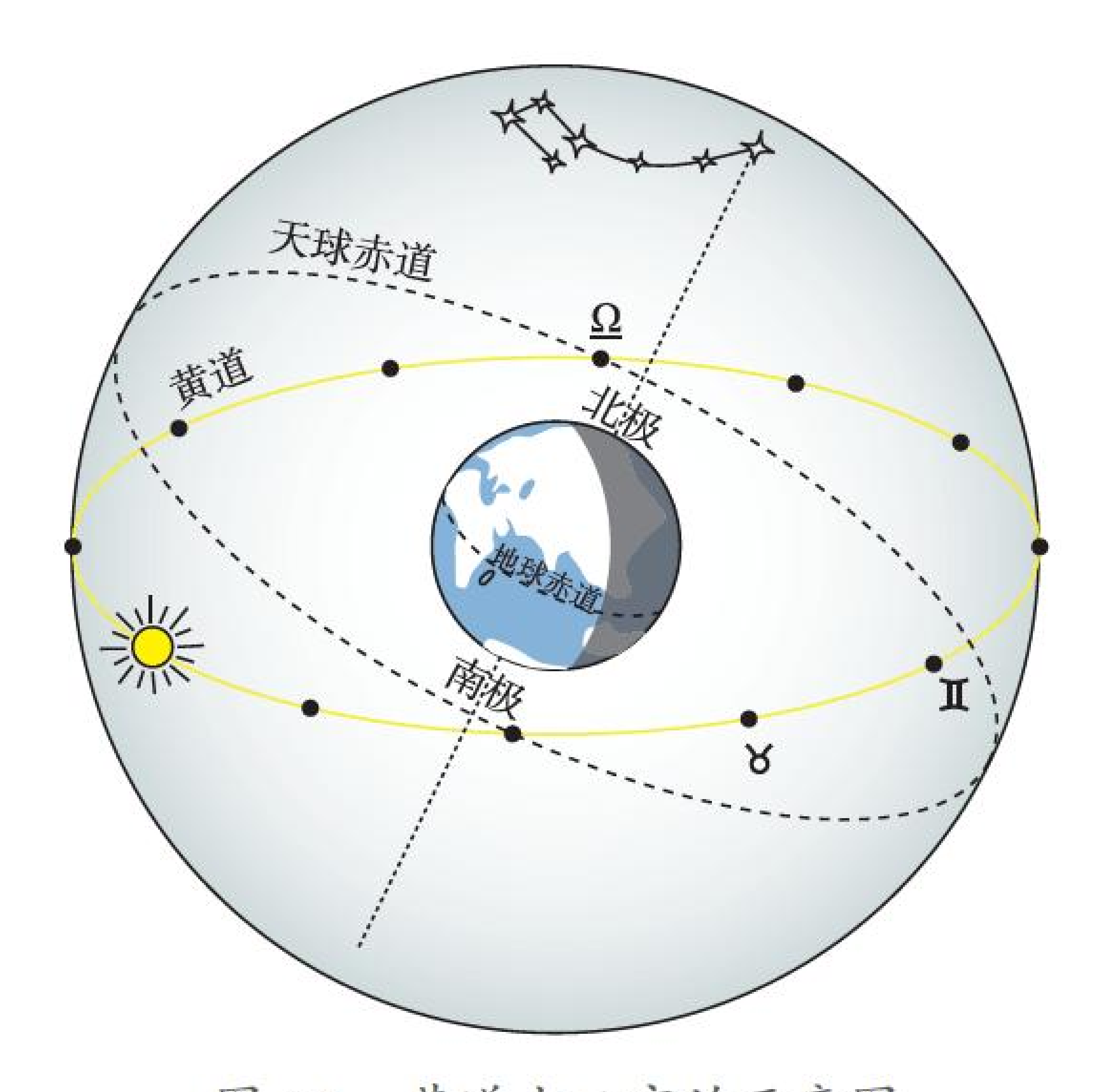


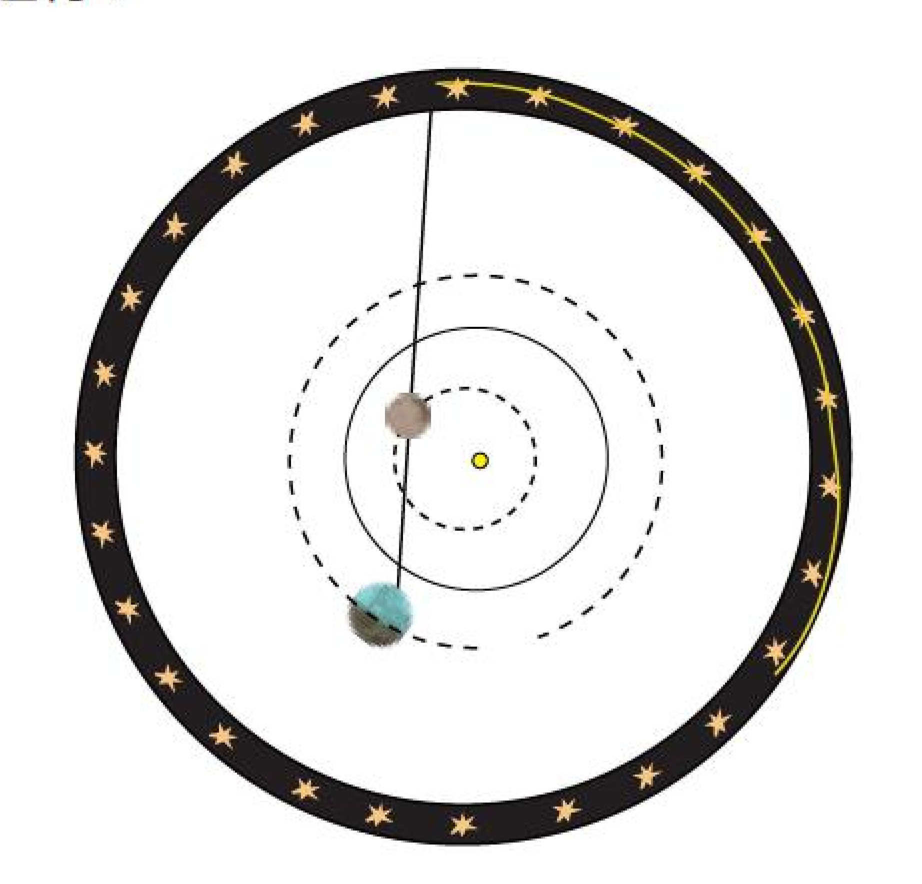
图 4.3　黄道十二宫的示意图

有了黄道带的基础知识，下面我们就可以讲一讲水星逆行到底是怎么回事了。

前面说过，地球和水星都在沿逆时针的方向绕太阳旋转。此外，两者拥有不同的角速度：水星只要花 88 个地球日就能绕太阳转一圈，而地球要花 365 个地球日才能绕太阳转一圈。这样一来，当地球绕太阳转上大约 90 度的时候，水星已经绕太阳转了整整一圈。这意味着，在地球绕太阳转 90 度的过程中，水星可以转到太阳的前面、侧面或背面。

图 4.4 就是水星逆行的原理图。作一条地球与水星的连线，并让它与黄道带相交于一点。随着时间的推移，这个交点在黄道带上的位置将不断变化。在地球上看来，这正是水星在黄道带上的运动轨迹。在地球绕太阳转 90 度的过程中，这个交点的运动轨迹将出现两种情况。第一种情况下，水星转到了太阳的侧面或背面。在此期间，这个交点将在黄道带上沿逆时针的方向运动。第二种情况下，水星转到了太阳的前面，也就是太阳与地球之间。在此期间，这个交点将在黄道

带上沿顺时针的方向运动。换句话说，从地球上看，此时水星在黄道带上的运动方向为顺时针，恰好与水星绕太阳的实际公转方向相反。这个现象就是所谓的水星逆行。



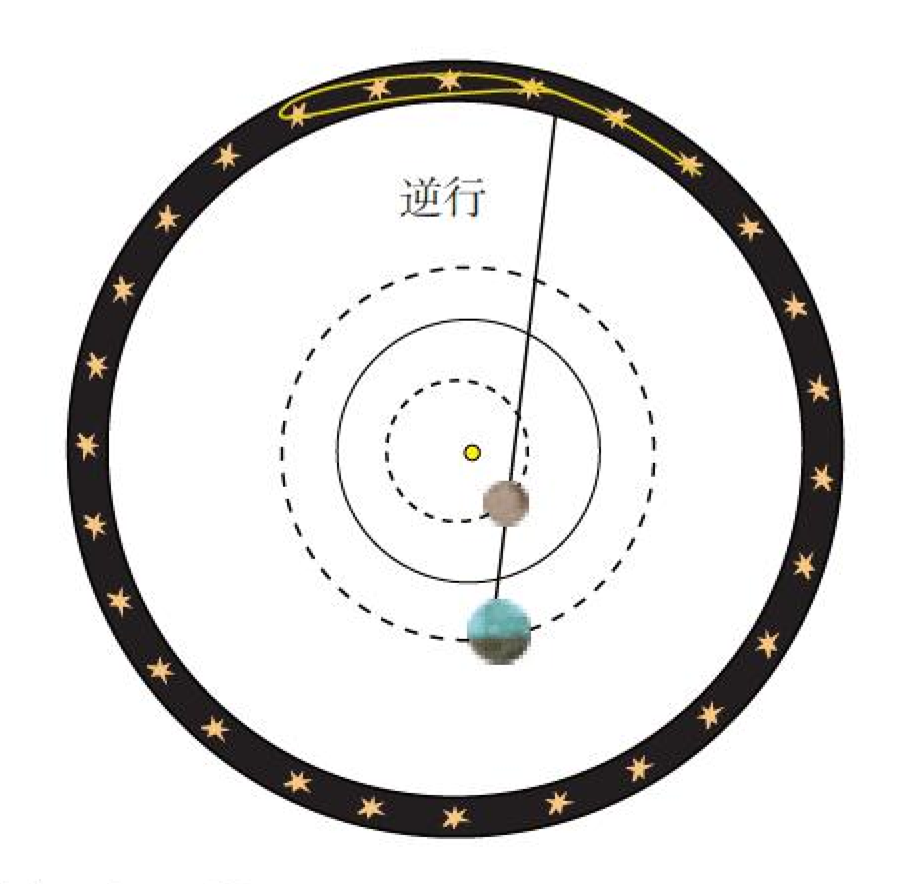


图 4.4 水星逆行原理图

很显然，水星逆行并不是说水星绕太阳公转的逆时针方向会发生改变，而是说当它转到太阳与地球之间的时候，从地球上看到的水星在黄道带上的运动方向会变成顺时针。因此，水星逆行只是一个普通得不能再普通的自然现象，并不会对我们的日常生活造成任何影响。

不只是水星，太阳系中除地球以外的所有行星全都会出现逆行的现象。事实上，在古希腊时代，行星的逆行一直是困扰地心说的最大难题。

在游览金星的时候，我已经向大家介绍过地心说。不过我当时讲的是它最终的版本，而不是它最初的样子。下面我就来聊聊地心说的演化史。

在古希腊，人们普遍相信地球一定静止在宇宙的中心。对此，大哲学家亚里士多德曾做过如下的论述：如果地球是运动的，那么当一个人跳起来的时候，他脚下的大地就会跑走；这样当他落地的时候，他就会落在与之前不同的地方。但实际情况是，一个人跳起来后还会落回原地。因此，大地一定是静止不动的。

今天，我们很容易就能看出这个论述的错误所在。当一个人跳起来的时候，因为他在水平方向上没有受到任何外力，所以他还是会在此方向上保持与地球一起运动的状态，这就是所谓的惯性。不过惯性这个概念，是伽利略在 17 世纪提出的。生活在 2000 多年前的亚里士多德，确实不可能想到惯性的存在。

古希腊人还认为，神创造的天界一定完美无瑕。此外他们也深信，圆是世界

上最完美的形状。因此，所有天体都必须作圆周运动。

所以最早的地心说是这样的：地球一直静止在宇宙的正中心；从内向外依次是月球、水星、金星、太阳、火星、木星和土星，而且这些天体都在绕地球作圆周运动；最外面的，则是镶满了恒星的天球。

相信你已经看出这个早期地心说理论的问题所在了。如果所有的行星都在绕地球作圆周运动，那么就不可能会出现行星逆行的现象。换句话说，在日心说中非常好理解的行星逆行现象，在最早的地心说中就变成了完全无法解释的超级难题。



图 4.5　托勒密

一直到古罗马时代，这个难题才被一个横空出世的天才破解。此人就是我们前面提到过的古罗马大天文学家托勒密（图 4.5）。

托勒密是一个百科全书式的人物。他曾经涉猎过很多研究领域，包括天文、地理、光学、占星和音乐。当然，他一生中最大的贡献还是在天文学领域。

公元 2 世纪中叶，托勒密写了一本关于天文学的百科全书，叫作《天文学大成》。600 多年后，这本书被阿拉伯人翻译成了阿拉伯语，然后在全世界传播开来。夸张的是，阿拉伯人觉得这本书实在太伟大了，干脆把书名改成了《至大论》，意思是“最最伟大的理论”。而在长达 1400 年的时间里，这本书一直是最权威的天文学著作。

为什么后人会对《天文学大成》如此追捧呢？因为在这本书中，托勒密想出了解决行星逆行难题的办法，也就是所谓的大圆套小圆。

图 4.6 就描述了托勒密的解决之道。托勒密认为，地球并非位于宇宙的正中心，而是与真正的中心存在着一个非常微小的

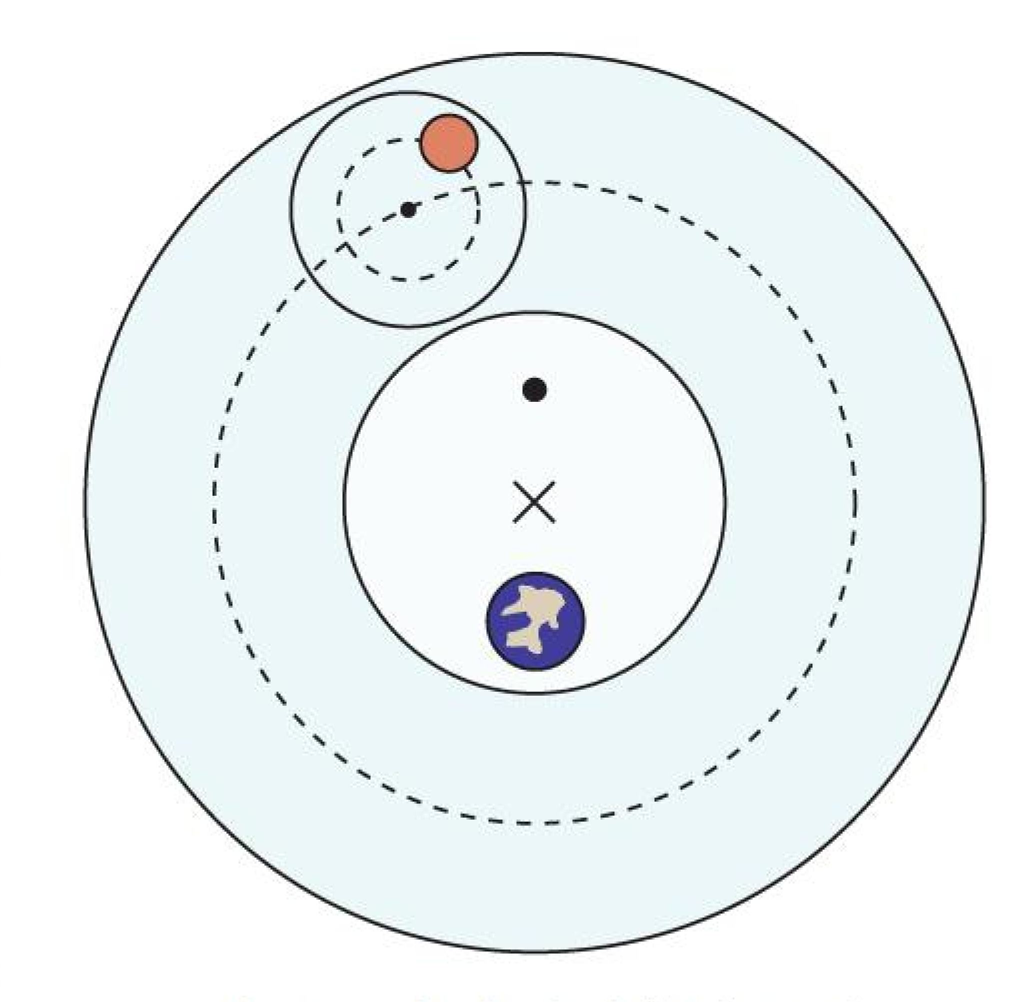


图 4.6　托勒密的解决之道

偏离。此外，五颗行星也并不是单纯地绕宇宙中心作圆周运动。首先，它们都在一个叫本轮的小圆上旋转；其次，本轮的圆心又在一个叫均轮的大圆上绕宇宙中心旋转。换句话说，这些行星的运动轨迹是由本轮和均轮这两个圆周运动组合而成的，看起来就像是公园里的旋转咖啡杯。

基于这个对行星轨道的修正，托勒密提出了最终版的地心说理论，即所谓的托勒密体系。事实上，托勒密体系与实际观测吻合得非常好。它不但能轻松破解行星逆行的难题，还可以很精确地预测所有行星的运动轨迹。正是因为如此，地心说才得以成为一个统治天文学界上千年的权威理论。

我们来做个总结。由于角速度的明显差异，当地球绕太阳转一圈的时候，水星差不多能绕太阳转四圈。而当水星运行到太阳与地球之间的时候，从地球上看到的水星在黄道带上的运动方向会变成顺时针，而这与水星本身绕太阳公转的方向相反。这个现象就是所谓的水星逆行。不只是水星，太阳系中的所有行星（除地球以外）全部会出现逆行的现象。而最早的地心说理论根本无法解释行星的逆行。公元 2 世纪中叶，托勒密写了《天文学大成》。在这本书中，他采用大圆套小圆的办法，建立了一个全新的地心说理论，并一举解决了行星逆行的难题。因此，行星逆行的现象推动了地心说的变革，并让它蜕变成了一个统治天文学界上千年的权威理论。

除了水星逆行，还有一个水星所特有的现象也在科学史上扮演过至关重要的角色。那就是水星近日点进动。



4.2 水星近日点进动如何揭开广义相对论崛起的序幕？

我们在游览地球的时候说过，开普勒在 17 世纪初发现了开普勒三定律，从而证明太阳系中的所有行星都在沿椭圆轨道绕太阳旋转。1687 年，牛顿出版了他的划时代巨著《自然哲学的数学原理》，从数学上严格地证明了引力的平方反比律能导出开普勒三定律。换句话说，只要牛顿的万有引力定律是正确的，行星就一定会沿椭圆轨道绕太阳旋转。反过来，如果行星的运动轨迹不是椭圆，那么牛顿引力理论就会遇到麻烦。

1859 年，法国天文学家奥本・勒维耶在研究水星运动轨道的时候发现了一个非常诡异的现象，那就是所谓的“水星近日点进动”。

为了解释什么是水星近日点进动，让我从相对简单的开普勒第一定律说起。开普勒第一定律告诉我们，行星会沿椭圆轨道绕太阳旋转，而且太阳恰好位于这个椭圆的一个焦点上。

所谓的椭圆焦点，是指椭圆内部的两个非常特殊的点。在椭圆边界上任选一点，画它与这两个焦点的连线，所得到的两条线段之和将始终保持不变。换句话说，椭圆上的每一点与这两个焦点的距离之和都是恒定不变的。将这两个焦点的连线延长所得到的椭圆内部最长的那条线段，就是椭圆的长轴。长轴与椭圆有两个交点。其中离太阳远的那个叫作远日点，而离太阳近的那个叫作近日点。

了解了近日点的概念，我就可以来讲讲什么是水星近日点进动了。图 4.7 就展现了水星近日点进动的基本图像。在开普勒和牛顿看来，水星绕太阳公转的椭圆轨道是稳定的。换言之，水星近日点应该固定在同一个地方，不会随时间的推移而发生改变。但勒维耶发现，这种看法是错的。正如图 4.7 所示，水星绕太阳公转的椭圆轨道并不稳定，而会发生螺旋式的改变；相应地，水星近日点的位置也并不固定，而会发生一定的偏移。这个水星近日点位置随时间改变的现象，就是水星近日点进动。

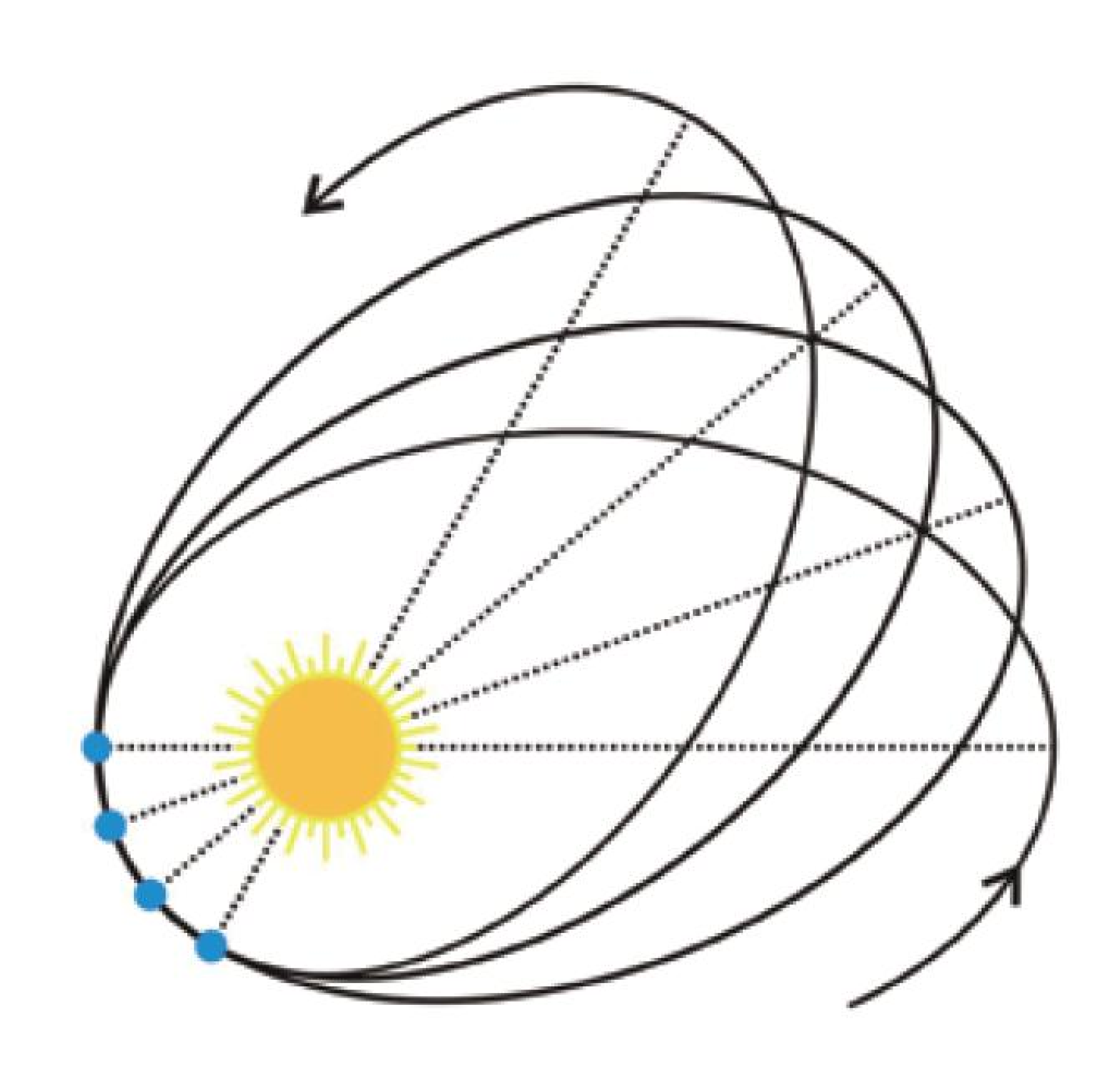


图 4.7 水星近日点进动

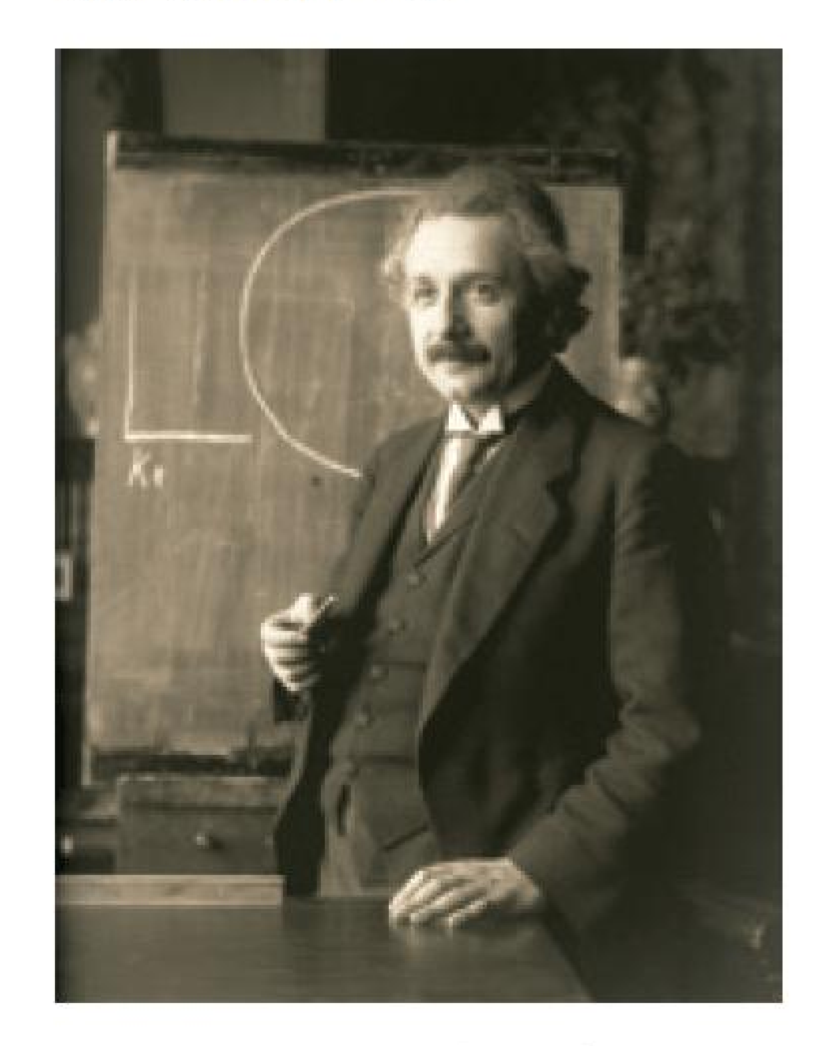
当然，这张图片画得相当夸张。真实的水星近日点进动其实非常微小。很明显，水星近日点进动前后的两个位置，以及太阳本身，构成了一个三角形；而这个三角形中以太阳为顶点的那个夹角，就能用来描述进动的大小。勒维耶发现，要经过整整 100 年的积累，这个夹角才能达到 574 角秒。

可能你不是很熟悉角秒，那我来解释一下。众所周知，1 小时包含 60 分钟，而 1 分钟又包含 60 秒钟。类似地，1 度的夹角包含 60 角分，而 1 角分又包含 60 角秒。换句话说，把我们熟悉的 90 度的直角平均分成 32.4 万份，其中的一份就是 1 角秒。因此，水星要进动整整 100 年，才能让它的近日点位置发生 574 角秒的偏离，你可以想象这个效应到底有多么微小。

现在问题来了：为什么水星会发生近日点进动呢？有两种可能。第一，太阳系中还有其他天体，它们的引力造成了水星近日点进动。第二，牛顿引力理论本身有问题。勒维耶对此进行了非常深入的研究。他发现太阳系中其他行星的引力会造成每世纪 531 角秒的偏离。这意味着，还有 43 角秒的偏离无法用牛顿引力理论来解释。

勒维耶是牛顿引力理论的忠实信徒。他压根不接受牛顿引力存在错误的可能性。为了解释这 43 角秒的偏离，勒维耶提出了一个非常大胆的猜想：在水星和太

阳之间，还存在一颗以前没发现的小行星。勒维耶把它称为“火神星”，并宣称正是火神星的引力导致了那额外的 43 角秒的偏离。但问题是，没有任何人能找到这颗火神星。


图 4.8　阿尔伯特·爱因斯坦

这样一来，水星近日点的 43 角秒的进动，就成了一个无人能破解的世纪难题。一直到半个多世纪以后，一位科学巨人的横空出世，才为这个世纪难题的解决带来了曙光。这位科学巨人就是大名鼎鼎的阿尔伯特·爱因斯坦（图 4.8）。

作为有史以来最伟大的两位科学家之一，爱因斯坦的人生中也曾经历过极为灰暗的时刻。1902 年，他给自己的大学同班同学格罗斯曼写了一封信，倾诉自己无法找到工作的痛苦。在这封信中，爱因斯坦甚至无奈地自嘲道:“上帝创造了蠢驴，还给了它一张厚皮呢。”

1900 年，爱因斯坦毕业于瑞士第一名校苏黎世联邦理工学院（Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,ETH）。在那个年代，大学生毕业后根本不愁找不着工作，因为大学生的数量非常稀少。举个例子，1900 年，包括爱因斯坦在内，ETH 物理系总共只有 4 名大学毕业生。其中 3 个人都顺利地找到了工作。唯一的例外就是爱因斯坦。

为什么只有爱因斯坦找不到工作呢？答案是他自己瞎折腾。读大学的时候，爱因斯坦是一个相当叛逆并且恃才傲物的年轻人。他特别喜欢逃课。就算偶尔去上课，也经常对一些讲课不好的老师表示不屑。这样一来，他就把 ETH 物理系的全体教授都得罪光了。所以毕业以后，没有一个教授愿意给他写推荐信，这就导致爱因斯坦没能在学术界找到工作。

毕业后整整一年半的时间，爱因斯坦都找不到一份体面的工作，只好靠给别人当家教来勉强维持生计。在此期间，他不知曾向多少个数学、物理、化学教授寄过求职信，结果全部石沉大海。极度郁闷中，爱因斯坦就给自己的大学好友格罗斯曼写了前面提到的那封诉苦信。

格罗斯曼动了恻隐之心。他通过自己父亲的关系，让爱因斯坦走后门找到了

一份在伯尔尼专利局当技术员的工作。这份工作的工资不高，但是有一个特别大的好处，那就是可以上班摸鱼。事实上，爱因斯坦只需花两三个小时就能完成一整天的工作；剩下的时间，他就可以用来搞自己的物理学研究了。

爱因斯坦的办公桌上总是堆着写满公式的稿纸。要是有领导路过，他就会迅速地把稿纸塞进抽屉，然后假装自己在认真工作。

正是在这些上班摸鱼的日子里，爱因斯坦破茧成蝶，变成了一个真正意义上的科学巨人。1905 年，他一口气发表了 5 篇划时代的论文，在量子论、原子论和狭义相对论这三大领域都取得了革命性的突破。正因为如此，1905 年也被后人称为“物理学奇迹年”。

但即使取得了如此伟大的成就，爱因斯坦也并没有立刻时来运转。事实上，当时除了极少数的专家，压根没人知道他是谁。所以他还是只能待在专利局里继续当他的技术员。1908 年，苏黎世的一所高中在报纸上刊登广告，想招一名数学教师。当不上大学老师的爱因斯坦心动了，向那所高中递交了申请，结果在第一轮就被淘汰了。

可能你会问了：“爱因斯坦年轻时倒霉也就罢了，为什么在缔造了物理学奇迹年以后，依然没能出人头地呢？”答案是，当时的爱因斯坦其实并没有做出他一生中最重要的贡献。要到 1915 年，他才能提出自己一生中最伟大的理论，那就是被誉为科学史上最美理论的广义相对论。

在很多人的心目中，广义相对论都是一种宛如天书、只有一小群科学家才能搞懂的理论。但事实上，要是给它取一个好名字，根本不会把这么多人吓跑。广义相对论其实应该叫“爱因斯坦引力”。

我们前面已经讲过牛顿引力。它说的是，世界上任何两个物体之间都存在引力，而且引力的大小与这两个物体的质量成正比，而与它们距离的平方成反比。但不知你是否想过，引力到底是怎么产生的呢？这个问题，牛顿引力理论就回答不了了。但“爱因斯坦引力”理论却可以。

为了更好地理解爱因斯坦引力理论，让我们来做一个思想实验。

想象一张非常平坦且弹性十足的大床垫，有一个小玻璃球在上面滚动。如果没有别的干扰，玻璃球会一直沿直线滚动。现在把一个大铁球放在床垫上，它立刻会让床垫凹陷下去。很明显，如果此时玻璃球再从大铁球周围经过，其运动轨

迹就会发生明显的改变。如果初速度足够大，玻璃球还能逃离这片洼地；但如果初速度比较小，它就会沿着被压弯了的床垫滚下去，最终撞上这个大铁球。

重点来了。现在请发挥一下你的想象力。你觉得这个小玻璃球沿凹陷床垫滚下去的场景，像不像是它受到了大铁球的引力（图 4.9）？确实很像，对吧？

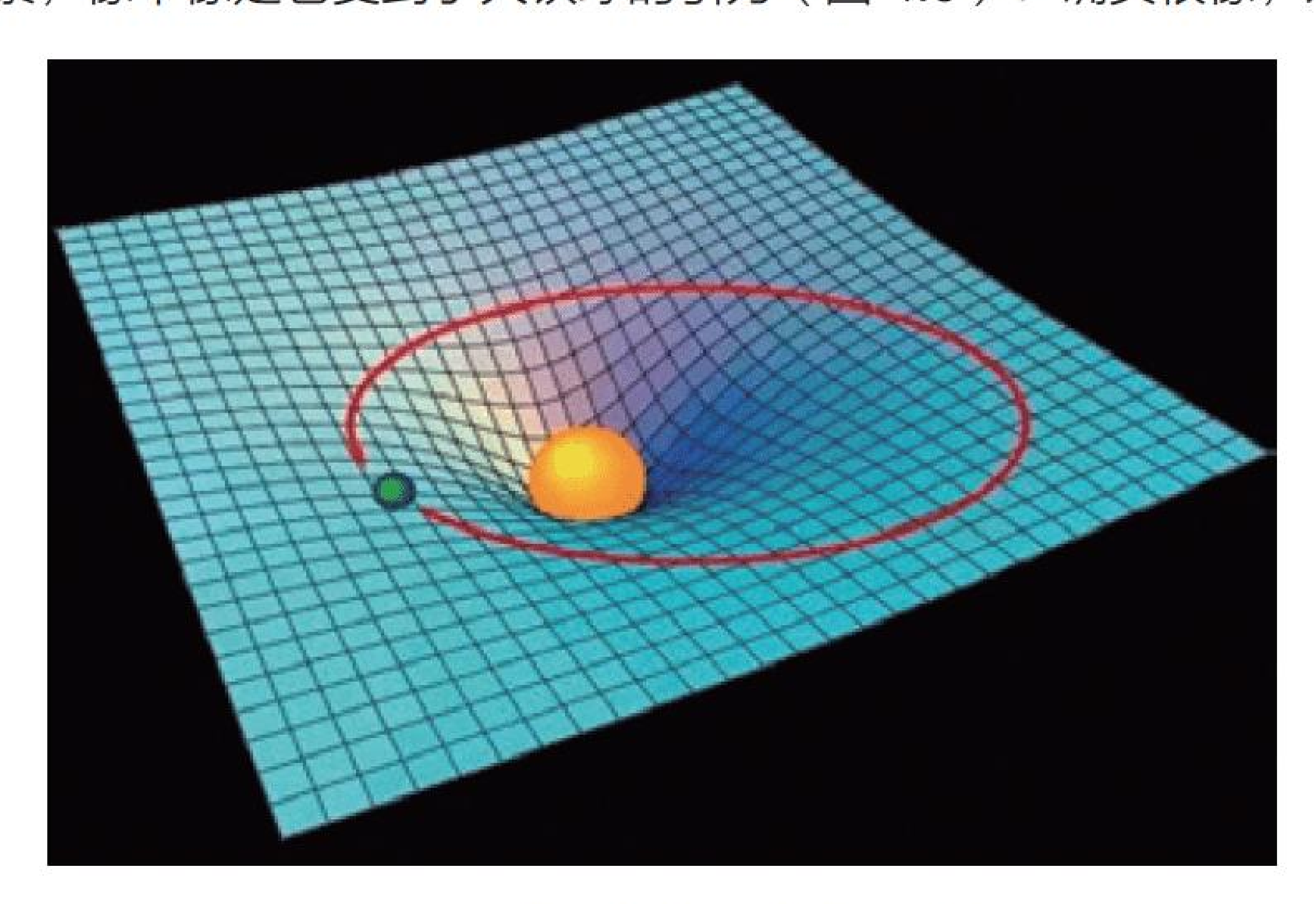


图 4.9　广义相对论的基本图像

现在把床垫当成时空本身，把小玻璃球当成地球，把大铁球当成太阳。爱因斯坦引力理论说的是，太阳的存在会把时空本身压弯，而时空弯曲对周边天体的影响，恰恰等价于把这些天体拉向太阳的万有引力。换句话说，引力其实就是有质量的物体把原本平坦的时空压弯了的结果。时空弯曲就是万有引力之源，这就是爱因斯坦引力，或者说广义相对论最核心的思想。

可能你会问了："那么牛顿引力和广义相对论到底有什么差别呢？"答案是，在绝大多数的情况下，两者其实并没有什么差别。只有在大质量恒星附近，或者说引力特别强的时候，两者之间才会出现一个很小的差异。换句话说，当引力特别强的时候，广义相对论会比牛顿引力多一个修正项。

1915 年，爱因斯坦发现，这个多出来的修正项会产生额外的水星近日点进动，而且这个进动的幅度恰好是每世纪 43 角秒！这意味着，广义相对论能够完美地解决牛顿引力无能为力的水星近日点进动的世纪难题！

事实上，这就是广义相对论的第一个实验验证，它也揭开了广义相对论在学术界崛起的序幕。

关于广义相对论的崛起，不妨再多说两句。

除了水星近日点进动，科学家还想到了一个能用来检验牛顿引力和广义相对论的办法，那就是所谓的“光线偏折”(图4.10)。

假设太阳后面有一颗恒星。这颗恒星发出的光，在经过太阳附近的时候，会由于受到太阳的引力而发生偏折。这样一来，在最初恒星发射的光线和最后射入我们眼里的光线之间，就会出现一个夹角，被称为偏折角。最关键的是，用牛顿引力算出来的偏折角是 0.87 角秒，而用广义相对论算出来的偏折角是 1.74 角秒。这意味着，只要通过天文观测，测出这个偏折角的大小，就可以判断到底是牛顿引力还是广义相对论更靠谱。

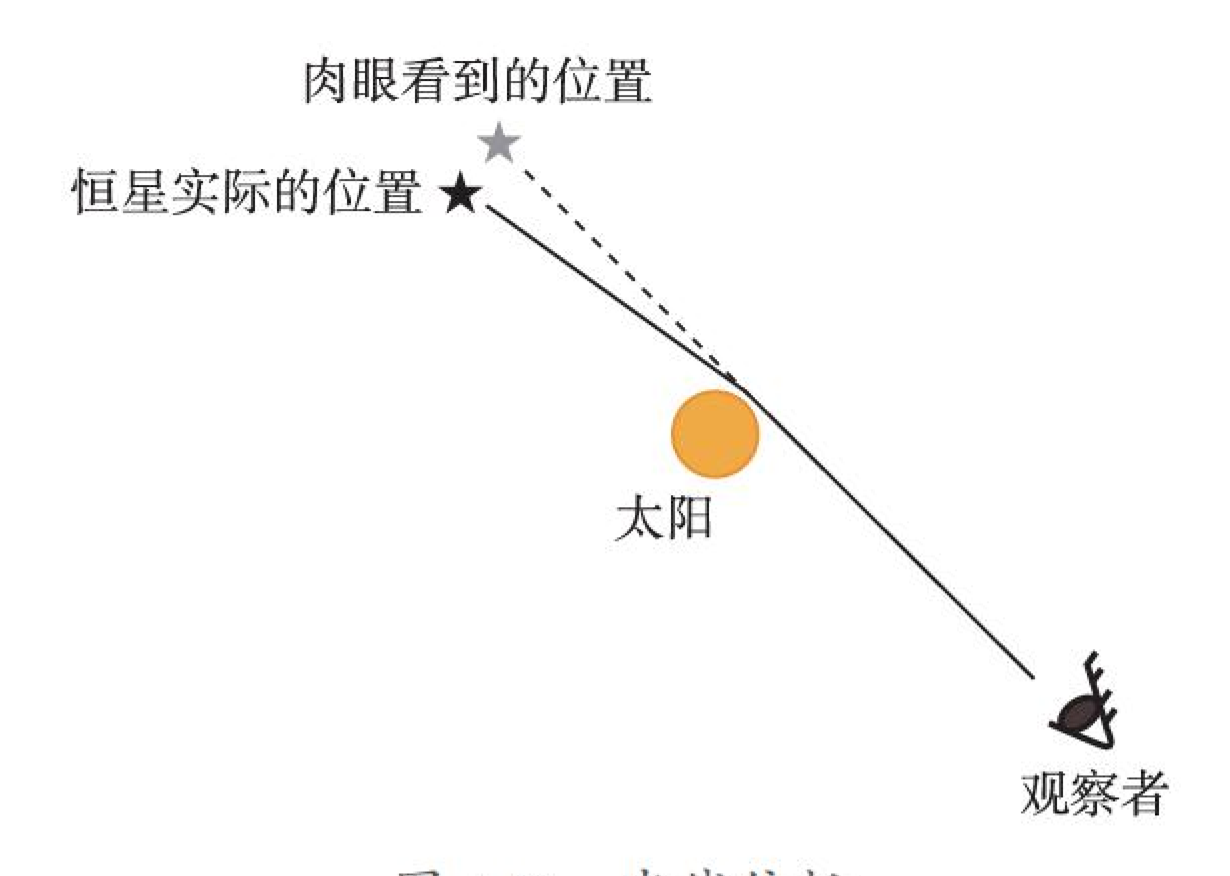
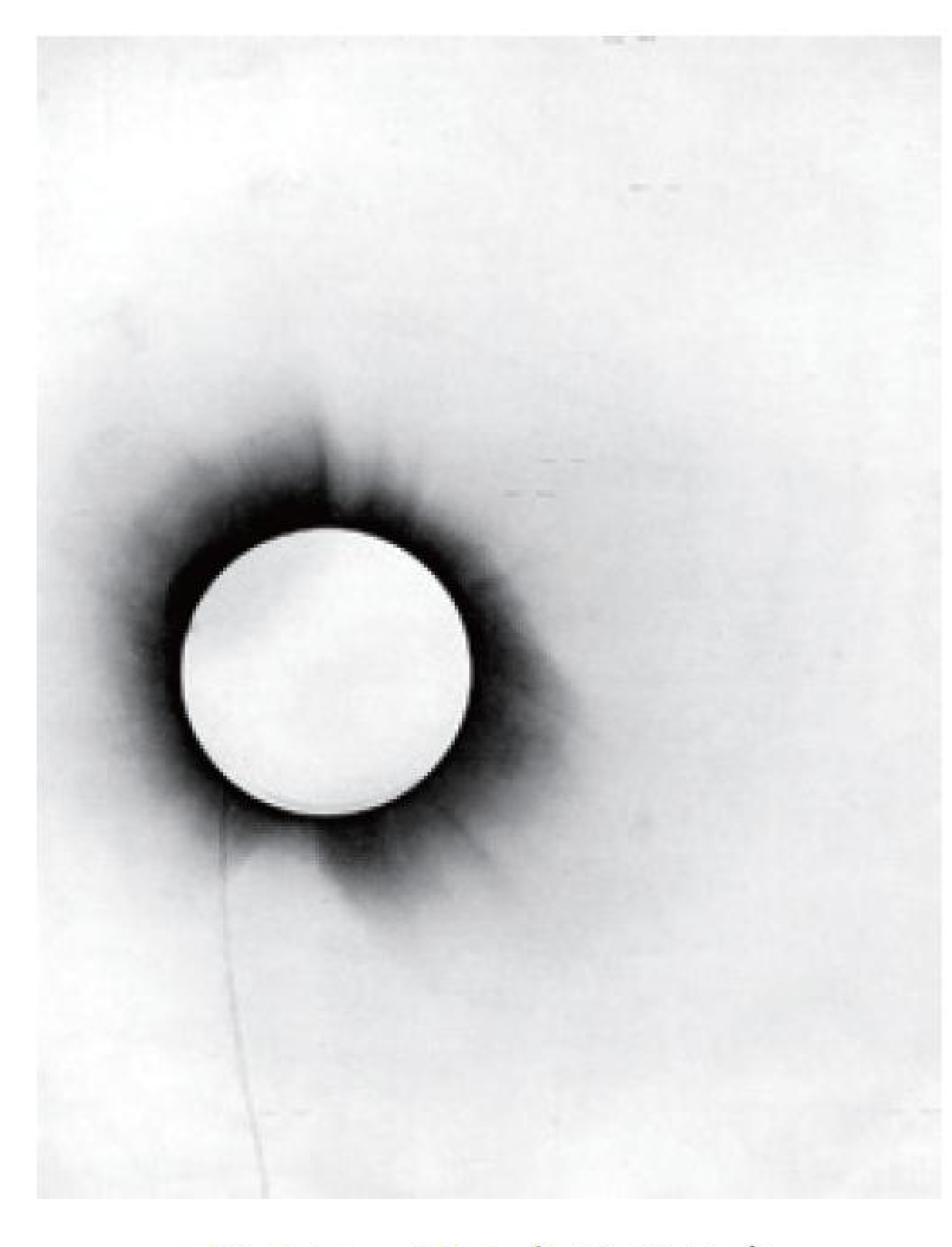


图 4.10　光线偏折

但在一般情况下，这个观测是做不了的。因为太阳本身就会发出很强的光，所以从遥远恒星射过来的那点微弱的星光，一跑到太阳附近立刻会被太阳的光芒吞没。这意味着，要想进行光线偏折的观测，必须先遮住太阳光。因此，这个观测必须在日全食的时候进行。

1919 年 5 月 29 日，就发生了一次日全食(图 4.11)。那一年，英国著名天文学家亚瑟·爱丁顿组织了两支远征队，分别前往非洲和南美洲去观测日全食。同年 11 月 6 日，爱丁顿在英国皇家学会宣布了最终的测量结果：去非洲的那组人测出的偏折角是 1.61 角秒，而去巴西的那组人测出的偏折角是 1.98 角秒。这两个结果都青睐爱因斯坦的广义相对论。

从那以后，爱因斯坦的广义相对论就取代了牛顿的万有引力，成了学术界最主流的引力理论。爱因斯坦也因此成为足以与牛顿比肩的、有史以来最伟大的科


图 4.11　1919 年的日全食

学巨人。

我们来做个总结。1859 年，勒维耶发现了水星近日点进动：经过 100 年的累积之后，水星近日点的位置会发生 574 角秒的偏离。勒维耶发现太阳系中其他行星的引力会造成每世纪 531 角秒的偏离，但还有 43 角秒的偏离无法用牛顿引力理论来解释。1915 年，爱因斯坦提出自己一生中最伟大的理论：广义相对论。广义相对论认为，时空弯曲就是万有引力之源。这个理论完美地解决了牛顿引力无能为力的水星近日点进动的世纪难题。这揭开了广义相对论在学术界崛起的序幕。

我们已经介绍了两个与水星有关，并在科学史扮演过至关重要角色的天文现象：水星逆行和水星近日点进动。当然，这两个天文现象都是在地球上观测到的。接下来，让我带你去游览一下水星本身。



水星上有哪些让人大跌眼镜的自然现象?

众所周知，水星是太阳系中最小也最靠近太阳的行星。类似于金星，水星也一直活动在太阳的周围。如果以地球为顶点，分别向水星和太阳连线，所得到的角度最大只有 28 度。因此，只有在清晨或黄昏、太阳光比较暗的时候，我们才可以在东边或西边的地平线附近看到水星。

但不同于热火朝天的金星探测，水星探测是件特别冷门的事情。事实上，到目前为止，总共只有两个探测器造访过水星。

第一个造访水星的探测器是 NASA 的水手 10 号。我们在游览金星的时候就已经提到了水手计划。这个计划总共发射了 10 个探测器，前 9 个探测器不是去了金星，就是去了火星。而 1973 年发射的水手 10 号，则成了历史上第一个同时游历两个行星的探测器。除了在 1974 年 2 月飞越金星以外，水手 10 号还于 1974 年 3 月到 1975 年 3 月之间三次飞越水星。在此期间，它拍摄了大量的水星表面的图片。唯一的遗憾是，水手 10 号每次飞越时都对着水星的同一面；因此，它只拍到了水星表面 45% 的区域。

一直到 21 世纪，水星才迎来它的第二个地球访客。2004 年 8 月 3 日，NASA 发射了“信使号”探测器（图 4.12）。不同于水手 10 号，信使号选择了一条非常复杂的航行路线。在 6 年半的时间里，它多次飞临地球、金星和水星，并利用这些行星的引力来调整自己的轨道。2011 年 3 月 18 日，信使号终于成功地进入了水星轨道，成为了目前唯一一个能环绕水星飞行的探测器。透过信使号的镜头，人们看到了一个与月球颇为相似的世界。在水星表面，遍布着形态各异的环形山（即撞击坑），光是直径超过 100 千米的超大型撞击坑就多达 15 个。其中最大的撞击坑被称为“卡洛里盆地”，其直径能达到 1550 千米。

2015 年 04 月 30 日，在环绕水星飞行了 4 年之后，信使号寿终正寝；它在水星的北极附近坠毁，形成了一座篮球场大小的新环形山。

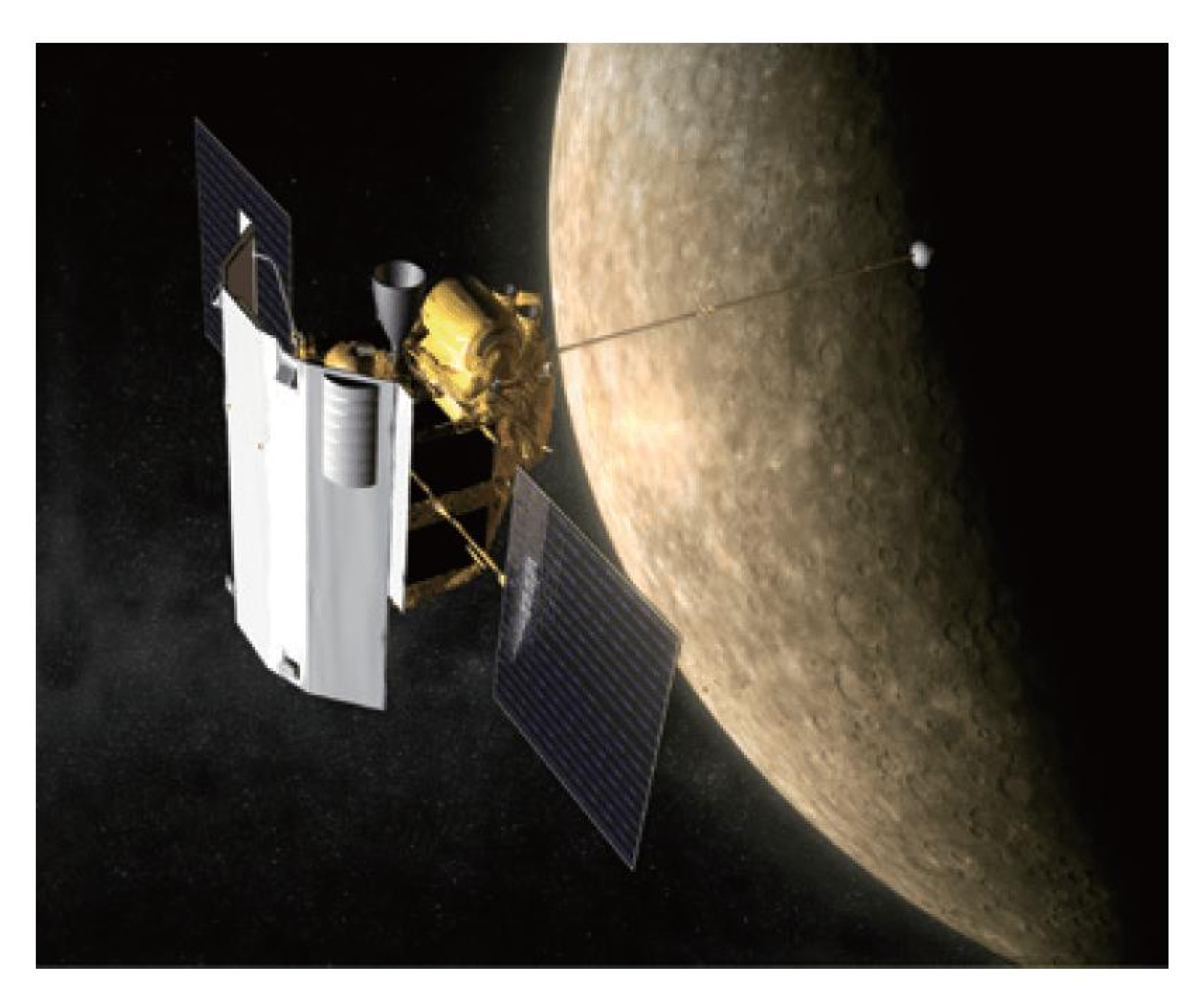


图 4.12　信使号水星探测器

可能你会问了：“为什么在超过半个世纪的时间里，人类只发射了两个水星探测器？”主要有两个原因。

第一个原因是，探测水星的难度非常非常大。众所周知，所有朝太阳系中心飞的探测器，都会受到太阳引力而作加速运动。很明显，要想探测水星，探测器就必须在接近水星的时候减速。由于水星是最靠近太阳的行星，水星附近的太阳引力相当强大，让探测器减速也变得非常困难。此外，水星还拥有所有行星中最快的运动速度（48 千米・秒 $^{-1}$）。要想让探测器在减速的过程中追上它，甚至进入绕它飞行的轨道，自然更是难上加难。这让水星变成了太阳系中最难探测的行星之一。为了做到这一点，信使号走了一条非常复杂的航行路线，并通过不断飞临地球、金星和水星来调整自己的轨道，最后花了 6 年半的时间才成功进入水星轨道。

第二个原因是，有很长一段时间，天文学家都对水星不太重视。换言之，很多人都认为水星离太阳太近，肯定是一个特别枯燥乏味的不毛之地；花那么多人力物力去探测它，性价比很低。

但水手 10 号和信使号的一些发现，让人们意识到水星其实并没那么简单。

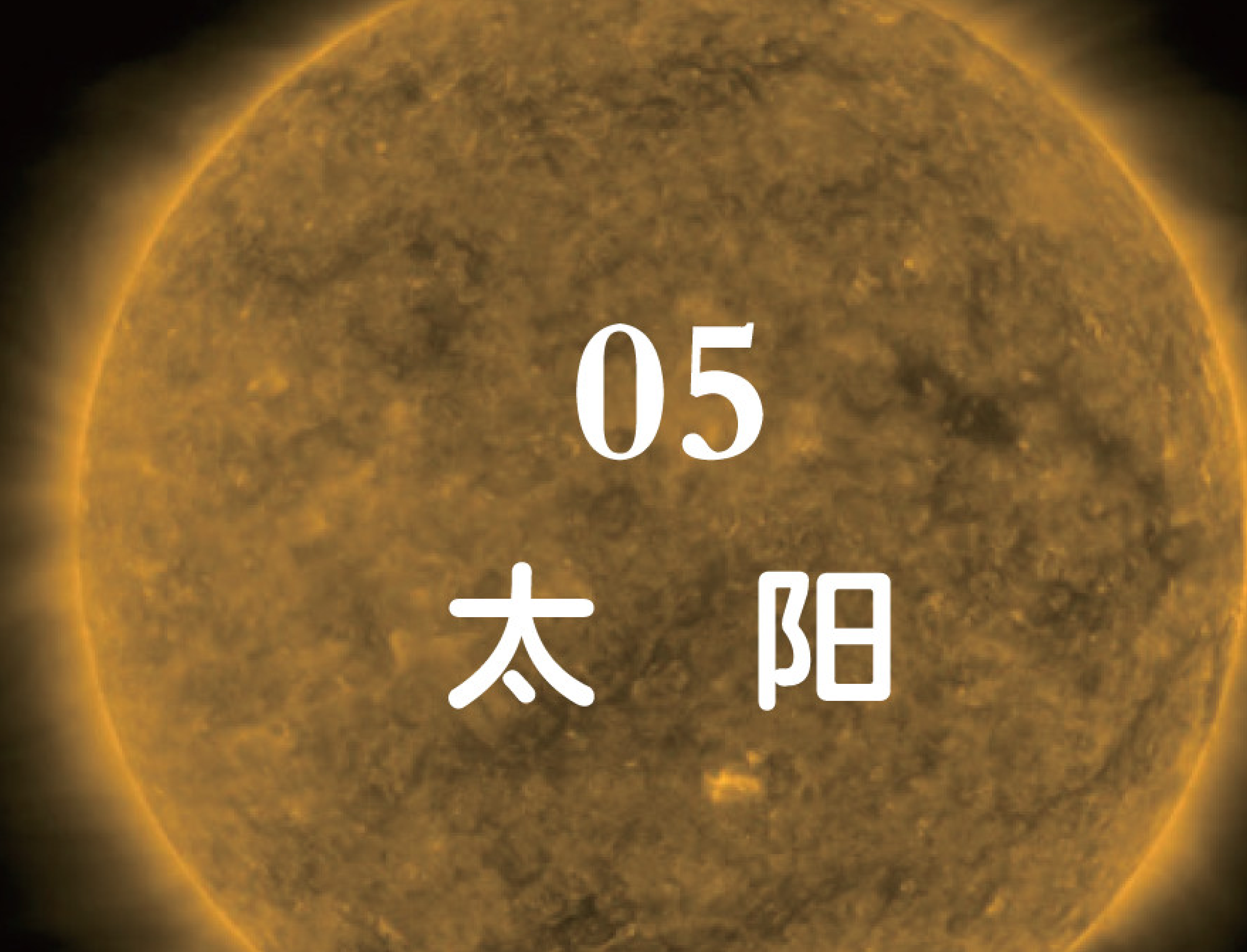
下面，我就来盘点一下其中三个最让人大跌眼镜的发现。

1. 水星有磁场。在 1974 年前，人们普遍认为像水星这样体积小自转慢的行星，不可能拥有自己的磁场。但水手 10 号发现，水星有一个能覆盖整个行星的稳定磁场，其强度能达到地球磁场的 1.1%。这已经足以构筑一个屏障，来抵御太阳风的侵袭了。为什么一个体积这么小、自转又这么慢（58.6 个地球日自转一圈）的行星会有自己的磁场？一般认为，这是由于在水星内部，也像地球一样，有一个液态的铁核。但为何会有这个液态铁核，目前还没完全搞清楚。

2. 水星有冰。其实早在 20 世纪 90 年代，人们就已经通过地面的望远镜，观察到水星北极地区有异样的反光。2011 年，信使号发现此区域有大量的冰。据科学家估算，如果把这些冰均匀地铺满华盛顿特区，其高度能达到 4 千米。为什么在离太阳这么近的水星上会有如此大量的冰？目前最主流的解释是，这是几十亿年前把水星撞得坑坑洼洼的那些小行星带来的。其中的部分冰，落入了水星北极的一些永远也不会晒到太阳的大坑里，就一直保存了下来。这意味着，水在太阳系中很可能是普遍存在的。

3. 水星有过全球性的岩浆海洋。太阳光射到水星表面，会被地表的岩石反射回来；通过分析这些反射光，就可以确定水星表面岩石的化学成分。2011 年，信使号发现整个水星表面的岩石中都含有大量岩浆的成分。这意味着，整个水星表面都曾被岩浆浸泡。换句话说，水星上曾经有过全球性的岩浆海洋。

我们来做个总结。由于离太阳太近，再加上拥有所有行星中最快的运动速度，水星一直是太阳系内最难探测的行星之一。在超过半个世纪的时间里，总共只有两个探测器，水手 10 号和信使号，到访过水星。这两个探测器发现了不少让人大跌眼镜的自然现象，包括水星有磁场、水星有冰以及水星有过全球性的岩浆海洋。这充分说明，水星并不是一个枯燥乏味的不毛之地，而是一颗有故事的行星。



05

太 阳



5.1 太阳光谱如何揭示太阳的元素构成?

离开了水星，让我们前往这次太阳系之旅的第五站：太阳（图 5.1）。

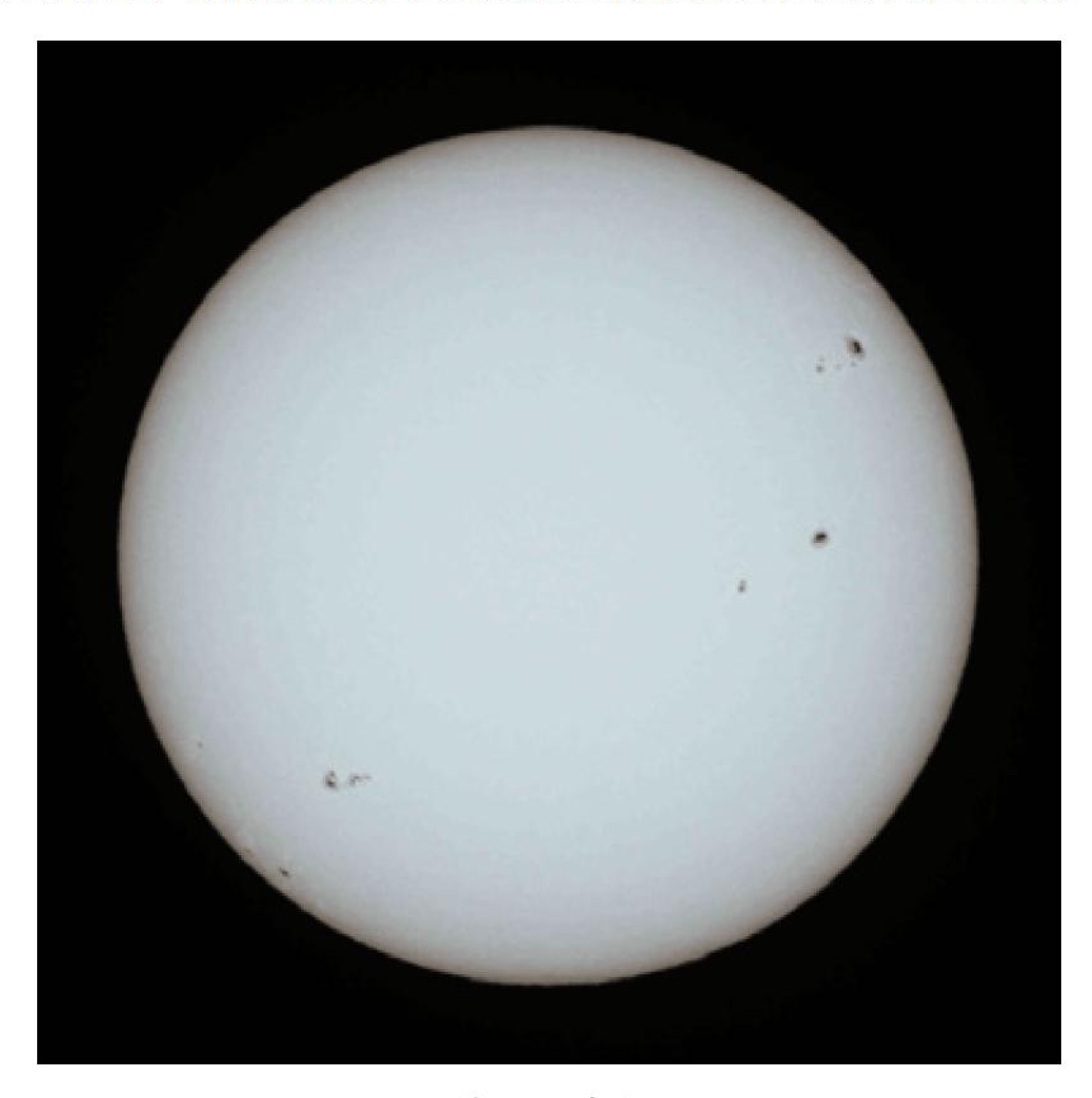


图 5.1 太阳

质量：1.989×10^{30} 千克（地球质量的 33.3 万倍）

体积：1.410×10^{27} 立方米（地球体积的 130 万倍）

与太阳的平均距离：0

众所周知，太阳是太阳系的绝对主宰。它的质量约为地球的 33.3 万倍，占太阳系总质量的 99.86%。正因为如此，太阳系内所有其他的天体，全都在围绕

它旋转。此外，它的半径约为 69.6 万千米，相当于地球半径的 109 倍。换句话说，如果把太阳当成一个容器，里面能放下 130 万个地球。

正因为如此，太阳在天文学中拥有非常特殊的地位。事实上，它是人类除地球以外研究得最多的天体。就以太阳系为例。除地球以外的其他行星，在天文学中都只是一个小小的研究方向。而太阳，本身就是一个完整的研究学科。说得通俗一点，专门写其他行星的书可能只有一两本，而专门写太阳的书则能堆满一个书架。


图 5.2　艾萨克·牛顿

而人类了解太阳的一个最主要的途径，就是研究太阳光谱。那什么是太阳光谱呢？让我们从一位尽人皆知的大人物的故事讲起。他就是我们前面已经提到过的艾萨克·牛顿（图 5.2）。

孟子曾说过，“故天将降大任于斯人也，必先苦其心志，劳其筋骨，饿其体肤，空乏其身，行拂乱其所为，所以动心忍性，曾益其所不能。”这句话，堪称牛顿的真实写照。

牛顿的身世非常悲惨。他的老家是英格兰乡下一个叫伍尔索普的小村庄，爸爸是当地的一个小农场主，而妈妈是一个家道中落的乡绅的女儿。在牛顿出生前 3 个月，他爸爸就因病去世。临死前，别人让老牛顿在遗嘱上签字；由于不会写自己的名字，老牛顿就在上面签了一个大大的“X”。

1643 年 1 月 4 日，牛顿来到人间。他是一个特别瘦小的早产儿，差一点早早夭折。在他 3 岁那年，他妈妈为了钱嫁给了一个年纪比她大两倍的老头子。这个老头不喜欢牛顿，所以牛顿被留在了自家的农场，由外婆抚养。牛顿特别恨自己的继父，曾打算一把火烧了他的房子。这种恨意延续了整整 7 年。直到牛顿 10 岁那年，他的继父过世，他妈妈才搬回原来的房子与牛顿同住（图 5.3）。

12 岁那年，牛顿被送到了附近城镇去上中学，从此开始了他人生中最黑暗的一段时光。由于矮小的身材、孤僻的性格以及遗腹子的身份，他遭受了非常残酷的校园霸凌。残酷到什么程度呢？数年间，他经常在放学后挨揍，而且会被打得鼻青脸肿，甚至是头破血流。



图 5.3 牛顿故居

在一个日记本里，牛顿写满了下面这样的绝望之语："我很无助！没有我的容身之处！在房子的顶楼——地狱的底层！我要摆脱现在的生活，但不知道该怎么做，我只有哭泣！"

在这么悲惨的境遇下，牛顿的学习成绩也变得很不好。所以在他 16 岁那年，他妈妈就让他退了学，好回家帮忙干农活。幸好牛顿的中学校长觉得这个孩子是个可造之才，专门跑到牛顿家去游说；再加上牛顿的舅舅也觉得自己的外甥颇有潜力，承诺会在经济上提供帮忙，牛顿这才得以重返校园。我们都应该感谢这两位有识之士。要是没有他们，整个人类文明史都得改写。

重回校园的牛顿变得极端努力，很快就成了全校最好的学生。1661 年，他终于脱离苦海，考入了剑桥大学的三一学院。那一年，牛顿 18 岁，距离他改写人类文明史，还有不到 6 年的时间。

当时剑桥大学的学生分为三类：贵族学生、普通学生和贫困学生。贵族学生的学费很贵，但也享有很多特权，例如只用 3 年就能够大学毕业；普通学生交正常的学费，需要用 4 年才可以大学毕业；而贫困学生几乎不交学费，但必须要给教授和贵族学生当佣人，来维持半工半读的生活。牛顿是减费学生，在因为学业

成绩优异而获得一笔丰厚的奖学金之前，他当了 3 年的佣人。

在三一学院的前两年，牛顿一直都在图书馆里自学。第三年，他遇到了自己的伯乐——第一任卢卡斯数学教授艾萨克·巴罗。在巴罗的指引下，牛顿对数学产生了浓厚的兴趣，并在 22 岁那年发现了广义二项式定理。这是牛顿做出的第一个重大的成果。由于这个贡献，他被录取为三一学院的研究生。

但就在牛顿即将开始他的研究生生活之际，伦敦突然爆发了一场大瘟疫。为了保护师生的安全，剑桥大学遣散了学生，让他们回乡下避难。无奈之下，牛顿只好于 1665 年 8 月回到伍尔索普村，并在那里待了两年。这两年，后来成了科学史上永恒的传奇。人类的文明史，也就此改写。

在这短短的两年之内，牛顿完全凭借一己之力，开创了三门影响深远的学科，包括微积分、牛顿力学和光谱学。

其实在游览地球的时候，我们就已经谈到了微积分和牛顿力学。创立微积分让牛顿成为了有史以来最伟大的数学家之一，而创立牛顿力学则让他成为有史以来最伟大的物理学家之一。关于这两门学科，这里就不再多说了。下面，我来讲讲知名度相对较低的光谱学。

1666 年，在乡下避难的牛顿做了一个著名的实验。他找了一个一团漆黑的房间，然后在一扇窗户上开一个小圆孔，只让少量的阳光射进来。然后，他在小圆孔的旁边放了一个自己制造的三棱镜。

三棱镜是一种用玻璃制成且横截面为三角形的光学仪器。光照到三棱镜的一个侧面之后，会先后发生两次折射，然后从另一个侧面射出，而且射出的光会向底边发生偏折。更重要的是，三棱镜对不同颜色的光会有不同的偏折程度：它对红光的偏折程度最小，而对紫光的偏折程度最大（图 5.4）。

牛顿发现，穿过小圆孔的白色太阳光，经过三棱镜的折射以后，变成了一个由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等不同颜色构成的光斑。由此，牛顿证明了太阳光并非只有一种单一的颜色，而是由各种颜色的光合成的。这就是著名的牛顿色散实验。

知道了牛顿色散实验，太阳光谱就好理解了。它其实就是太阳光经过色散系统分光后，得到的各种单色光按波长大小依次排列的图案。

顺便多说一句。在合成太阳光的诸多单色光中，所占比重最大、整体能量最强的是绿光。事实上，这还可以解释为何我们看到的大多数的植物都是绿色的。

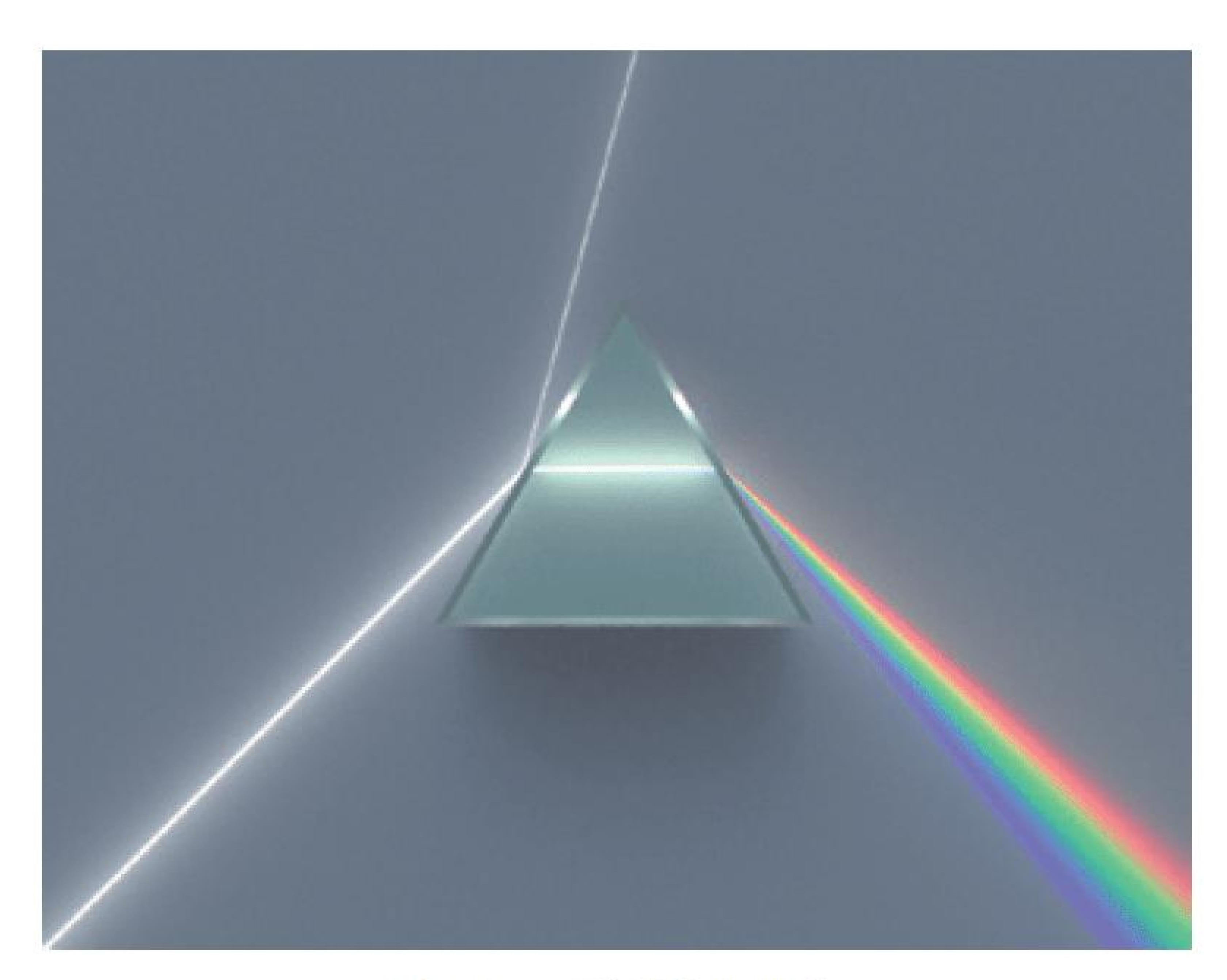


图 5.4　三棱镜分光现象

这些绿色植物中含有一种叫叶绿素的物质。它可以吸收位于可见光频率区间两端、整体能量较弱的红光和紫光，而把位于中间、整体能量较强的绿光反射回去。这样一来，植物就能既利用能量较弱的红光和紫光进行光合作用，又不会受到能量较强的绿光的伤害，从而实现趋利避害的目的了。此外，被反射的绿光射入我们的眼睛，我们自然就会觉得这些植物是绿色的。

1802 年，英国化学家威廉・沃拉斯顿对牛顿的实验进行了改进。他用很窄的狭缝代替了小圆孔。这样一来，最后得到的就不是一个光斑，而是一条由各种单色光按波长排列而成的狭长光带（即太阳光谱）。更关键的是，他发现太阳光谱并不连续，其中有 7 条非常窄的暗线。换言之，有 7 种特定波长的光消失了。这是一个非常重要的发现。但遗憾的是，沃拉斯顿并没有对这个问题进行深究。

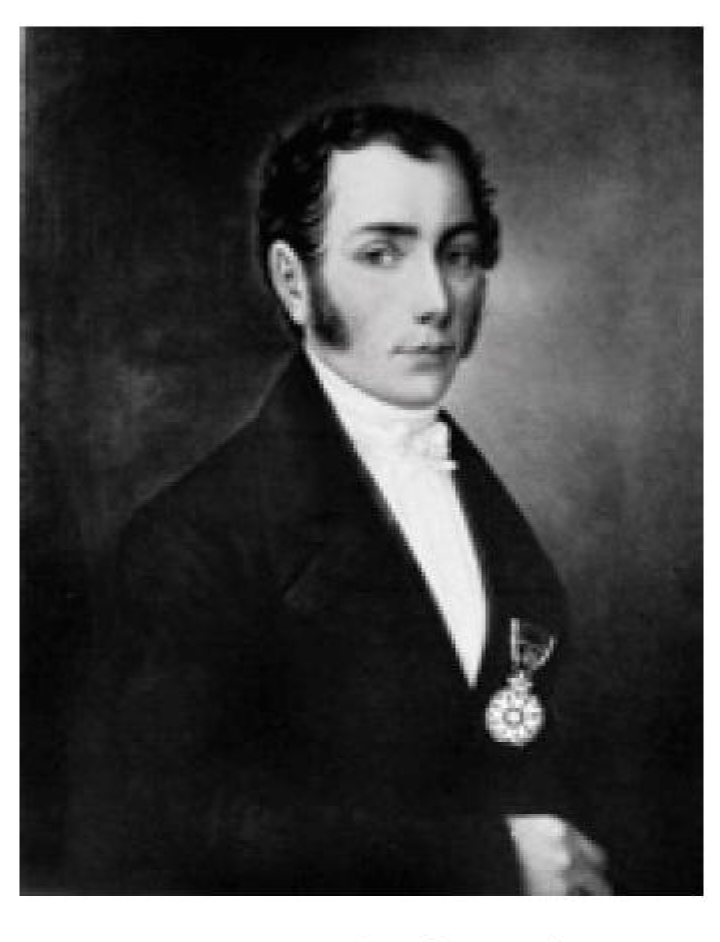


图 5.5　夫琅禾费

所以，幸运女神就转向了同时代的另一个科学家。此人就是德国物理学家夫琅禾费（图 5.5）。

夫琅禾费也有一个非常悲惨的童年。他生在德

国巴伐利亚的一个小城。10 岁那年母亲去世，11 岁那年父亲去世，他成了一名孤儿。12 岁的时候，迫于生计，夫琅禾费不得不背井离乡，跑到慕尼黑的一家生产玻璃的作坊去当学徒。顺便多说一句。那个年代，学徒全都住在老板的家里。

这家玻璃作坊的附近有一所主日学校。所谓的主日学校，是一种专门面向穷人且只在星期天上课的特殊学校。夫琅禾费很希望能去这所主日学校上学。但他的老板非常凶恶，无时无刻都逼他干活，这让他根本没有任何读书的机会。在苦苦煎熬了两年之后，14 岁的夫琅禾费终于等到了他人生的转折点: 他住的房子塌了。

大难不死，必有后福。奇迹般幸免于难的夫琅禾费，也因此结识了他人生中的两个贵人。一个是前来救援的下一任巴伐利亚国王马克西・米利安一世，另一个是恰好路过救援现场的企业家约瑟夫・乌兹施奈德。在米利安一世的干预下，夫琅禾费获得了接受教育的机会。5 年后，他离开了那家玻璃作坊，加入了乌兹施奈德公司。

乌兹施奈德公司主要生产各种光学仪器，包括望远镜、放大镜和显微镜。在那里，夫琅禾费显露出了他惊人的才华。通过革新玻璃的制造工艺，以及发明对玻璃表面进行打磨抛光的新机器，夫琅禾费成功地生产出了当时世界上品质最好的光学仪器。很快地，他就成了公司的合伙人，公司也更名为乌兹施奈德 – 夫琅禾费公司。而巴伐利亚也逐渐取代英国，成了世界光学工业的中心。

但这并不是夫琅禾费传奇故事的全部。在经营企业之余，他也会搞一点与光学有关的科学研究。1814 年，他发明了一种叫分光仪的新仪器，大大提高了色散实验的精度。结果，夫琅禾费发现太阳光谱中的暗线远远不止 7 条，而是有 570 多条。不止如此，他还逐一测出了这些暗线的波长。为了纪念夫琅禾费，后人就把太阳光谱中的主要暗线称为夫琅禾费线（图 5.6）。

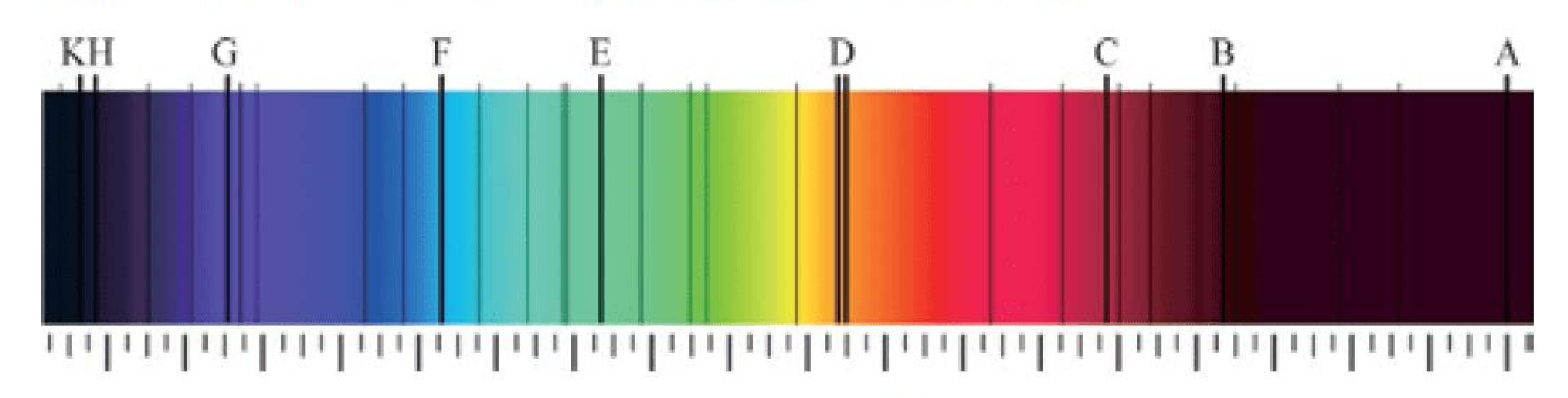


图 5.6　夫琅禾费线

现在问题来了。为什么太阳光谱中会有夫琅禾费线呢？直到 19 世纪 60 年代，

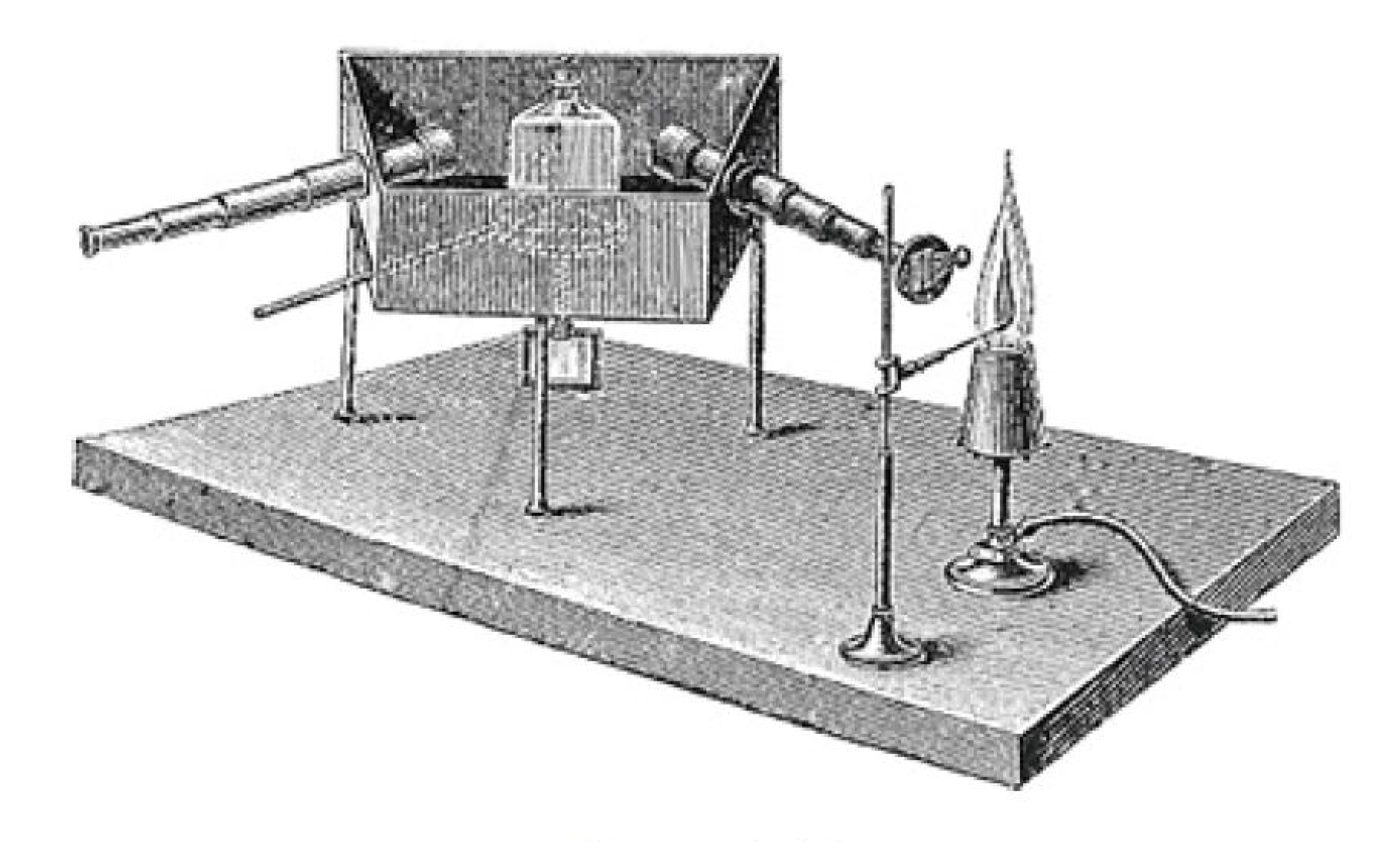
德国物理学家古斯塔夫·基尔霍夫和德国化学家罗伯特·本生才找到了这个问题的答案。


图 5.7 古斯塔夫·基尔霍夫和罗伯特·本生

基尔霍夫可谓是年少成名。21 岁那年，还是一名大学生的基尔霍夫就发现了两条全新的电学定律（即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律），从而在历史上留下自己的名字。时至今日，这两条定律依然在电气工程领域有着极为广泛的应用。

30 岁的时候，基尔霍夫当上了海德堡大学的教授。在那里，他遇到了比自己大 13 岁的化学教授本生。不久之后，意气相投的两人决定合作搞研究（图 5.7）。而他们选择的研究方向正是光谱学。

基尔霍夫和本生发明了新仪器——本生灯（图 5.8）。只要把某种物质放到图中右边的火焰中，就可以测出这种元素发出的光谱，这就是所谓的发射光谱。不止如此，这个仪器还能测出这些发射光谱的谱线波长。


图 5.8 本生灯

他们把各种各样的元素都放到火焰上烧，然后再记录每种元素的发射光谱以

及相应的波长。研究发现，每一种元素都会发出一些特定波长的光；换言之，每一种元素都有自己独一无二的发射光谱。举个例子，图 5.9 就是氢元素的发射光谱。



图 5.9 氢元素特有的发射光谱

除了会发射特定波长的光，每一种元素也都能吸收特定波长的光，从而在原本连续的光谱上留下一些暗线，进而形成所谓的吸收光谱。更关键的是，对任意一种元素而言，它的发射光谱和吸收光谱所对应的光，都具有完全相同的波长。

接下来，这两人把地球上各种元素的吸收光谱，与太阳光谱进行对比。结果表明，太阳光谱中的夫琅禾费线的波长，其实与很多元素吸收光谱的波长完全一致。

唯一合理的解释是，太阳上同样有这些元素。它们吸收了那些与自身匹配的特定波长的光，从而破坏太阳光谱的连续性，进而在太阳光谱上留下大量的暗线。这意味着，夫琅禾费线其实就是太阳上所有元素的吸收光谱。

因此，通过把夫琅禾费线与地球上各种元素的吸收谱线进行对比，就可以推断出太阳上都有哪些元素。目前在太阳表层已经发现了 90 多种元素，其中质量百分比排在前 5 位的元素分别是氢（73.46%）、氦（24.85%）、氧（0.77%）、碳（0.29%）、铁（0.16%）。

事实上，光谱不但能用来研究太阳，也能用来研究所有的恒星和星系。因此，它已成为天文学中最重要的研究工具之一。

我们来做个总结。1666 年，牛顿做了著名的色散实验，证明了太阳光其实是由各种颜色的单色光组合而成。这个发现，开创了光谱学这门学科。1814 年，夫琅禾费发现太阳光谱中存在 570 多条暗线，这就是所谓的夫琅禾费线。19 世纪 60 年代，基尔霍夫和本生通过把地球上各种元素的光谱与太阳的光谱进行对比，证明了夫琅禾费线其实就是太阳上所有元素的吸收光谱。这意味着，通过研究遥远恒星和星系的光谱，就能确定它们的元素构成。

我已经讲了人类如何确定太阳上都有哪些元素。下一节，我要讲一个在科学史上更有影响力的问题：太阳的能量来源是什么？

5.2 太阳的能量是怎么产生的？

众所周知，太阳是地球的能量源泉。那太阳到底能辐射出多大的能量呢？我们可以来估算一下。

很明显，太阳辐射的能量将呈球形均匀向外扩散。根据能量守恒定律，太阳系中某个位置接收到的太阳辐射的功率，与它和太阳距离的平方成反比。前面说过，地球与太阳相距一个天文单位，大概是 1.5 亿千米。在这个位置上，地球单位面积接收到的太阳辐射的功率就是所谓的太阳常数。目前世界气象组织公布的太阳常数值为 1368 瓦·米 $^{-2}$。

前面说过，日地距离约为 1.5 亿千米。因此，用一个半径为 1.5 亿千米的大圆球的表面积，去乘以太阳常数，就能算出太阳的总功率。最终的结果是 3.868×10^{26} 瓦。根据 2017 年 6 月发布的《BP 世界能源统计年鉴》，2016 年全球总发电量约为 2.48×10^{13} 千瓦时。这意味着，太阳 1 秒钟发出的能量，就足以让地球用上 432 万年。

现在问题来了。太阳辐射出来的能量如此巨大，那这些能量到底是怎么产生的？

在 20 世纪以前，人们一直把太阳当成一个燃烧着的大煤球。但这个理论有一个很严重的问题：这个大煤球通过燃烧所释放的化学能，根本支撑不了多长时间。开尔文勋爵曾做过估算，发现一个太阳质量的煤球大概只能燃烧几千万年。很明显，地球的年龄不可能比太阳的长。所以他始终坚信地球的年龄也只有几千万年。

一直到 20 世纪 20 年代，才有人找到了解释太阳能量来源的正确道路。此人就是英国著名天文学家亚瑟·爱丁顿（图 5.10）。



图 5.10 亚瑟·爱丁顿

我们之前已经提到过爱丁顿。1919 年，他通

过测量日全食期间的光线偏转角，验证了爱因斯坦的广义相对论。下面，我就来讲讲爱丁顿的故事。

爱丁顿是广义相对论最忠实的信徒之一。为此，他一直不遗余力地到处宣传广义相对论，并希望通过做实验来验证它。

不过在第一次世界大战爆发以后，爱丁顿却惹上了大麻烦。他是一个和平主义者，死活不肯去服兵役。这惹恼了英国当局，差点要在战后追究他的刑事责任。

就在最危急的时刻，英国皇家天文学家弗兰克·戴森出手相助了。他跑去找英国当局，说 1919 年 5 月 29 日会发生一次大规模的日全食；如果能派出英国的科考队，在这次日全食期间观测遥远星光的偏折，就能检验牛顿引力是否正确。这个提议打动了英国当局。戴森又马上趁热打铁地说，这个项目必须要由非常专业的天文学家带队，而整个英国再也没有比爱丁顿更合适的人选了，不如让他戴罪立功，去负责这个日全食观测。就这样，爱丁顿因祸得福，不但免去了牢狱之灾，还获得了他梦寐以求的检验广义相对论的机会。

1919 年初，爱丁顿组织了两支远征队，分别前往非洲和南美洲去观测日全食。在出发之前，远征队有一名天文学家跑去问戴森："万一观测结果既不支持牛顿力学，又不支持广义相对论，那该怎么办？"戴森回答："那爱丁顿肯定会当场疯掉。到时候你就是远征队的负责人，要把远征队平安地带回英国。至于爱丁顿，要是已经疯得没救了，就把他留在非洲吧。"

那一年，爱丁顿通过日全食的观测验证了爱因斯坦的广义相对论，这让他名扬天下。除此以外，爱丁顿还有很多其他的重要科学贡献。举个例子。1920 年他发表了一篇论文，首次提出太阳的能量可能是源于它内部的核聚变。

所谓的核聚变，是指多个质量较轻的原子核结合成一个质量较重的原子核，同时释放出巨大能量的过程。到目前为止，人类生产出来的威力最大的武器是氢弹，而氢弹就利用了核聚变的原理。

爱丁顿最早提出，太阳的能量其实源于太阳中心区域的氢聚变，也就是氢原子核聚变成氦原子核的过程。聚变前的氢原子核的总质量，要大于聚变后的氦原子核的总质量。根据著名的爱因斯坦质能关系 $E=Mc^2$，物体的质量与它的能量等价。因此在聚变中减少的质量就会转化成能量而释放出来。由于氢聚变释放出来的能量远远大于燃烧释放出来的化学能，太阳寿命只有区区几千万年的难题立

刻迎刃而解。但爱丁顿的理论存在一个很大的问题：它无法产生比氦更重的元素。但对太阳光谱的观测表明，太阳上还有很多更重的元素，例如碳、氮、氧。换言之，爱丁顿并没能完全破解太阳能量来源之谜。



图 5.11 核爆炸

让人意想不到的是，这个困扰了人类几百年的超级难题，20 年后被一个人快刀斩乱麻地解决了。此人就是著名的美籍德裔物理学家汉斯 · 贝特（图 5.12）。

贝特最早在法兰克福大学学习化学。但他总是笨手笨脚，做实验时经常会把硫酸溅到自己的衣服上。为了保命，他决定放弃化学，而转到物理系。恰好在此时，法兰克福大学的物理系来了一名新教授。他觉得贝特是可塑之才，就给贝特写了一封充满溢美之词的推荐信。靠着这封推荐信，贝特成功地转学到了慕尼黑大学，师从科学史上最传奇的名师阿诺德 · 索末菲（图 5.13）。



图 5.12 汉斯 · 贝特



图 5.13 阿诺德 · 索末菲

作为量子物理学的代表人物之一，索末菲一直是诺贝尔物理学奖的大热人选。但倒霉的

是，尽管他曾先后 81 次被提名为诺贝尔奖的有效候选人，却一次也没拿到这个最重要的大奖。

不过失之东隅，收之桑榆。虽然索末菲本人没能拿到诺贝尔奖，他却成为历史上培养出最多诺贝尔奖得主的老师。在他的博士生和博士后里，先后有 7 个人拿到了诺贝尔奖，其中就包括大名鼎鼎的量子力学先驱、哥本哈根学派的灵魂人物海森堡和泡利。

在索末菲的指导下，贝特很快就做出了足以获得博士学位的成果。在他的博士论文答辩会上，贝特第一次见到了他的毒舌师兄泡利。毫无悬念地，他也受到了泡利的挖苦。泡利对他说："在听了索末菲对你的介绍以后，我对你的期待可比你这篇博士论文的水准要高多了。"不过贝特认为，这话从泡利嘴里说出来，已经算是一种赞美了。

经历了 4 年博士后的生涯，贝特于 1932 年当上了图宾根大学的助理教授。但没过多久，希特勒就上台了。由于贝特拥有一半的犹太血统，他被学校直接解雇。关键时刻，还是索末菲伸出了援手。他先是给贝特提供了一个慕尼黑大学的研究职位，又在一年后把贝特推荐到英国曼彻斯特大学去做讲师。又过了两年，也就是 1935 年，贝特移民美国，成了康奈尔大学的助理教授。没过多久，贝特就在核物理领域做出了一系列非常重要的工作；由于怕其他大学来挖人，康奈尔大学直接把他晋升为了正教授。

1938 年，贝特收到了一份请帖，邀请他去华盛顿特区参加一个理论物理研讨会。贝特原本不想去，因为这个研讨会打着理论物理的旗号，实际上却要讨论一个天体物理的话题。当时，贝特对天体物理没有任何兴趣。但在氢弹之父爱德华·泰勒的劝说下，贝特还是决定如期赴会。这个决定改变了他的一生。

这个研讨会只邀请了 34 个人，但受邀者全是冯·诺依曼、钱德拉塞卡、泰勒和伽莫夫这样的大牌科学家。会议的主题就是我们一直在追问的那个问题：太阳的能量到底是怎么产生的？

在这次会议上，贝特听到了关于太阳能量来源的最新进展。作为一名核物理专家，贝特还没等会议开完，就已经意识到爱丁顿提出的氢聚变过程其实并不完整。完整的过程应该如图 5.14 所示。图中红色的小球代表带正电的质子，灰色的小球代表不带电的中子，白色的小球则代表正电子（电子的反粒子）；质子放

出一个正电子后，可以变成一个中子。氢原子核是最轻、最简单的原子核，它就由一个质子构成。4 个氢原子核在经过下图中所示的一系列反应后，能够聚合成一个包含两个质子和两个中子的氦原子核，同时放出两个正电子以及大量的能量。整个聚变过程被称为“质子 – 质子链反应”。正是这个质子 – 质子链反应，在长达 46 亿年的时间里，为太阳提供了用之不竭的能量。

不过，质子 – 质子链反应并不能解释太阳上的那些更重的元素是怎么来的。所以开完会并回到康奈尔大学以后，贝特又继续研究这个问题，终于发现了图 5.15 所示的碳氮氧循环。经由此图所示的反应过程，氢原子核和氦原子核可以聚合成碳原子核、氮原子核以及氧原子核，进而聚合成其他更重的元素。这样一来，太阳的能量起源之谜就得到了彻底的解决。

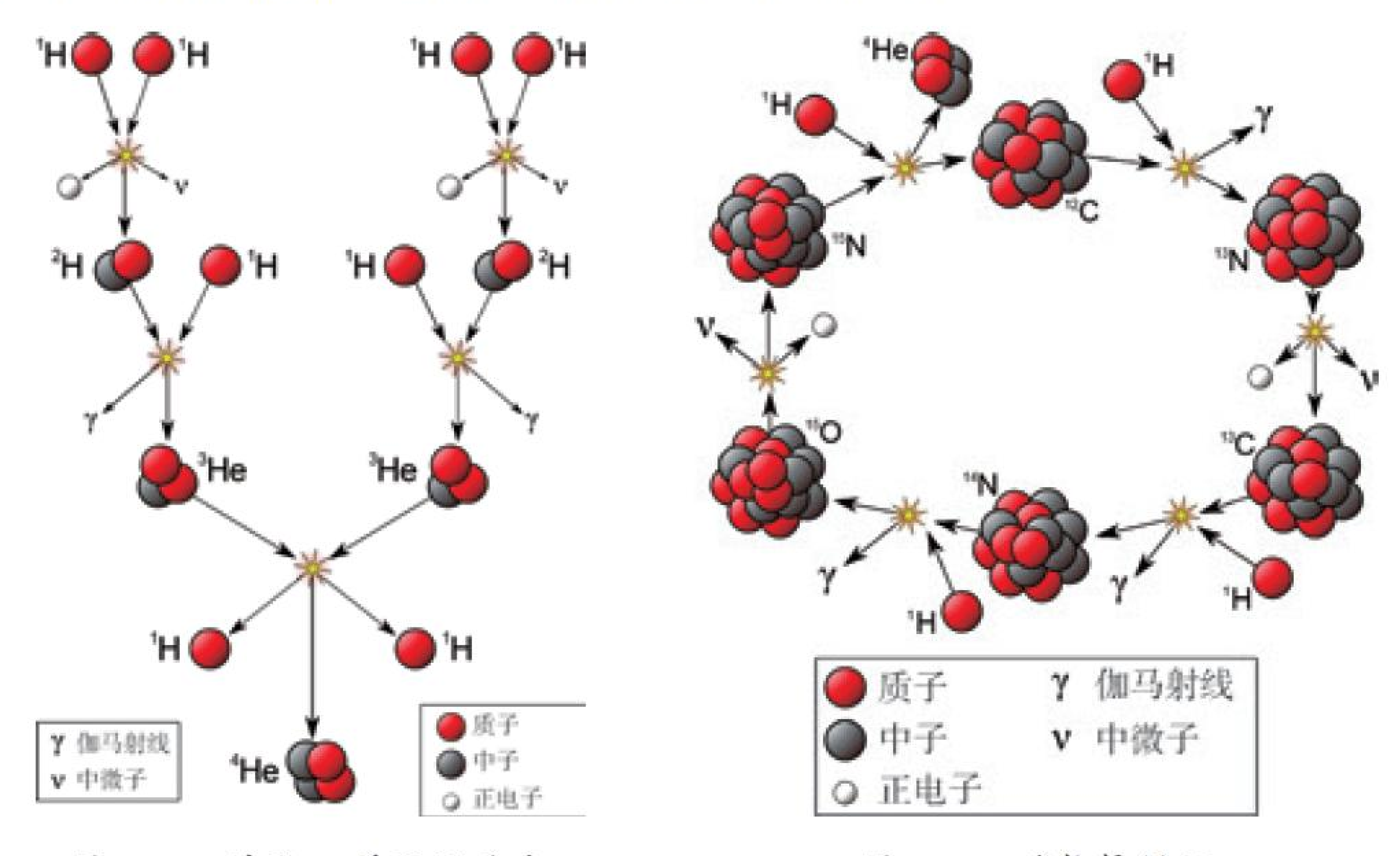


图 5.14　质子 – 质子链反应　　　　图 5.15　碳氮氧循环

再说一件关于贝特的趣事。贝特写完这篇碳氮氧循环的论文以后，把它投给了著名的物理学期刊《物理评论》。恰好那时，他妈妈为了躲避纳粹的迫害，也要移民美国。他想花 250 美元去给他妈妈买家具。有一天，贝特的一个学生告诉他，纽约科学院正在组织一个关于太阳能量来源的征文比赛，冠军有 500 美元的奖金。贝特二话不说，立刻从《物理评论》撤了稿，并把那篇碳氮氧循环的论文投给了这个征文比赛。当然，贝特赢得了冠军以及 500 美元的奖金。为了感谢自

己的学生及时通风报信，他给那个学生分了 50 美元。

当然，碳氮氧循环论文带给贝特的回报可远远不止 500 美元。1967 年，他因为这篇文章获得了当年的诺贝尔物理学奖。

最后多说几句。正是基于贝特的轻核聚变理论（即质子 – 质子链反应和碳氮氧循环），天体物理学家们才在 20 世纪五六十年代建立了所谓的太阳标准模型。这个模型能描述太阳的内部结构，解释观测到的各种现象，并预言太阳未来的演化。事实上，它已经成为太阳物理学的理论基石。

我们来做个总结。20 世纪以前，人们一直把太阳当成一个燃烧着的大煤球；但一个大煤球通过燃烧所释放的化学能，最多只能支撑几千万年，这显然是荒谬的。1920 年，爱丁顿最早提出太阳的能量可能是由于它内部的核聚变，从而为解决太阳的能量起源之谜指明了方向。1938 年，贝特参加了一个关于太阳能量起源的研讨会，进而对这个问题产生了浓厚的兴趣。他很快就提出质子 – 质子链反应和碳氮氧循环这两个具体的核聚变机制，从而快刀斩乱麻地解决了太阳的能量起源之谜。这也让他获得了 1967 年的诺贝尔物理学奖。

其实，无论是质子 – 质子链反应还是碳氮氧循环，都会产生一种非常神秘的粒子。到目前为止，关于这种神秘粒子的研究，已经 4 次获得了诺贝尔物理学奖。它就是我们下一节要介绍的中微子。

5.3 太阳中微子探测为什么会两次得到诺贝尔奖?

关于中微子，让我从一位非常传奇的物理学家的故事说起。此人就是我们前面提到过的著名的毒舌物理学家沃尔夫冈·泡利（图 5.16）。



图 5.16 沃尔夫冈·泡利

泡利是 20 世纪最有名的天才之一。他 18 岁成了当时屈指可数的广义相对论专家，21 岁获得了慕尼黑大学的博士学位，25 岁就提出了后来让他获得诺贝尔奖的“泡利不相容原理”。不过泡利最让人敬畏的，是他一眼看出错误的能力。事实上，如果他认为谁提出了一个错误的理论，立刻会毫不留情、异常尖酸刻薄地加以嘲讽。最可气的是，他几乎永远是对的。换言之，只要他说某个理论错了，这个理论基本上就必错无疑。因此，荷兰物理学家艾伦菲斯特给他取了一个外号，叫做“上帝之鞭”。

举一个被“上帝之鞭”抽到的例子。苏联有一个诺贝尔物理学奖得主，名叫朗道。此人也是天才少年出身，为人极度狂傲，谁都不放在眼睛里。有人甚至画过这样一幅漫画：朗道在台上授课，头上绕着光环；而学生在下面听课，个个都长着驴耳朵。言下之意是，在朗道面前，所有人都是蠢驴。但就连朗道这样的狂人，遇到泡利也会变成小绵羊。有一年，朗道去泡利任教的苏黎世大学做学术报告。报告结束后，出于对泡利的敬畏，朗道竟然破天荒地谦称自己讲的东西有可能是错的。没想到泡利在台下冷冷地说道：“你讲的东西根本就是乱七八糟，我搞不清哪些是对的，哪些是错的。”

有意思的是，“上帝之鞭”不但会用来抽别人，也会拿来抽自己。

在游览地球的时候，我们已经聊过放射性，也就是一些不稳定的原子核会自发地放出某些射线，然后衰变成一些稳定的原子核的现象。其中有一种射线是电

子流，称为 β 射线。放出 β 射线的衰变过程，就是所谓的 β 衰变。

在 1914 年，著名英国物理学家詹姆斯 · 查德威克发现一件非常诡异的事情。放出 β 射线以后，原子核的质量会减少；但减少的这部分质量所对应的能量，却大于此过程发出的 β 射线的能量。换言之，β 衰变竟然不遵守能量守恒定律。

听起来有点困惑？那我来打个比方。想象有一家银行，里面存放着一大笔钱。现在来了一辆名叫“β 射线”的运钞车，把这家银行里的一些钱给运走了。但工作人员在仔细核对后发现，银行里减少的钱，竟然比运钞车运走的钱要多。换句话说，有一部分钱神秘失踪了。

为了解释 β 衰变过程中能量不守恒定律的疑难问题，泡利提出了一个非常大胆的猜想。他认为，在 β 衰变的过程中还产生了一种幽灵般的粒子，它又小又不带电，所以我们探测不到。但这种粒子能带走一部分能量，从而造成了能量不守恒的假象。也就是说，银行的账目之所以对不上，是因为有一个隐身的窃贼把钱给偷走了。这种幽灵般的粒子，就是所谓的中微子。

我来简单说说为什么中微子会这么难探测。一个微观粒子是否好探测，取决于它容不容易与探测仪器发生相互作用。带正电的质子和带负电的电子都能与探测仪器发生电磁相互作用，所以就很容易探测。而不带电的中子无法与探测仪器发生电磁相互作用，所以就很难探测。好在中子的质量较大，可以用来轰击别的原子核；通过研究核反应的产物，就可以间接地探测中子。中微子就不一样了。它不仅不带电，自身质量还特别小，很难与一般的原子核发生反应。因此，中微子就能像幽灵一样，轻易穿过我们在日常生活中看到的几乎所有物体。

虽然这个中微子理论非常简洁漂亮，但是泡利不认为它能得到实验证实。他甚至还尖刻地自嘲到：“我犯了一个物理学家所能犯下的最愚蠢的错误，竟然预言了一种实验室里永远也探测不到的粒子。”

但事实证明，这并不是一个错误。人们后来不但探测到了中微子，关于中微子的探测还先后 4 次获得了诺贝尔物理学奖。由于篇幅有限，我就不逐一介绍这 4 次诺贝尔奖了。我只聊聊与我们的旅程有关的部分，那就是太阳中微子的探测。

太阳中微子，顾名思义就是太阳发出的中微子。最早探测到太阳中微子的人，是美国物理学家雷蒙德 · 戴维斯（图 5.17）。

20 世纪 60 年代，戴维斯想到了一个探测中微子的方法。一个中微子可以被

一个氯 37 的原子核捕获而发生反应，从而变成一个氩 37 的原子核和一个电子。但要想用这个方法探测，必须克服两个很大的困难：一是，无处不在的高能宇宙射线会对此实验造成干扰，所以必须先把这些宇宙射线屏蔽掉。二是，一个中微子被一个氯 37 的原子核捕获而发生反应的概率可以说是微乎其微，所以必须想办法提高中微子被氯 37 捕获的总概率。



图 5.17 雷蒙德·戴维斯

为了解决第一个难题，戴维斯把此实验放在了南达科他州的一个将近 1500 米深的地下废弃金矿中。这样一来，所有的宇宙射线都被厚厚的岩石挡住，但中微子却可以畅通无阻地穿过这些岩石。而为了解决第二个难题，戴维斯在这个废弃矿井中放了多达 10 万加仑（将近 380 立方米）的氯乙烯。由于这些氯乙烯中所包含的氯 37 的数目非常巨大，中微子被氯 37 捕获的总概率自然也就大大提高了。

1968 年，戴维斯发表了一篇论文，宣布他所领导的实验组首次观测到了太阳中微子。事实上，这篇论文在天文学界掀起了一场轩然大波。因为天文学家们发现，戴维斯实际测得的跑到地球上来的太阳中微子的数目，大概只有我们前文中提到过的太阳标准模型理论预言的 1/3。换句话说，有 2/3 的太阳中微子都神秘地消失了。很长一段时间，天文学家都普遍相信，要么是太阳标准模型，要么是戴维斯的实验，两者中肯定有一个是错的。这就是著名的太阳中微子消失之谜。事实上，要一直等到 21 世纪，才有人能彻底地解决这个难题。

解决这个难题的最初线索来源于粒子物理。

众所周知，一个原子是由质子、中子和电子构成的。质子和中子的质量都是电子的 1800 多倍。所以质子和中子被称为重子，而电子被称为轻子。

最开始的时候，人们都认为世界上只有电子这一种轻子。但后来人们发现轻子共有三种，另外两种分别是 1936 年发现的缪子（μ 子）和 1975 年发现的陶子（τ 子）。

所以就有一些科学家猜想，中微子也有三种，分别是电子型中微子、缪子型



中微子和陶子型中微子。不仅如此，他们还猜想不同的中微子之间可以相互转化。这就是所谓的“中微子振荡”理论。

“中微子振荡”理论到底靠不靠谱呢？这就要靠实验来检验了。20 世纪 80 年代初，美籍华裔物理学家陈华生率先提出，可以用重水代替氯乙烯，来作为太阳中微子的探测媒介。

为了解释什么是重水，让我从大家更为熟悉的水说起。众所周知，一个水分子由两个氢原子和一个氧原子构成。前文说过，氢是最简单的元素，其原子核内只包含一个质子。事实上，自然界中还存在着一种氢的同位素（质子数相同，中子数不同，本质上仍是同一种元素），名叫氘，其原子核内包含一个质子和一个中子。由两个氘原子和一个氧原子构成新分子，就是重水。

重水能和中微子发生三类不同的反应。第一类反应，只有电子型中微子可以参与；而后两类反应，三种中微子全都能参与。如果太阳发出的电子型中微子在传播过程中没有转化成其他两种中微子（也就是说，不存在缪子型中微子和陶子型中微子），那么三类反应测出的中微子数目应该完全相等。反过来，如果太阳发出的电子型中微子在传播过程中转化成了其他两种中微子，那么后两类反应测出的中微子数目就会多于第一类反应。这样一来，就可以检验“中微子振荡”理论是否正确了。

要想用陈华生提出的新方法来探测太阳中微子，关键要获得足够多的重水。但重水是价格昂贵的军用物资，一般很难弄到。幸运的是，加拿大的一个原子能机构愿意免费提供 1000 吨的重水（价值高达 3 亿美元），所以这个实验就选在加拿大萨德伯里市的一个超过 2000 米深的地下矿井中，名叫萨德伯里中微子天文台（Sudbury Neutrino Observatory, SNO）。

1984 年，陈华生在 SNO 的第一次大会上，被选为了这个项目的领导者。但不幸的是，仅仅 3 年之后，他就因为患白血病而去世，享年只有 45 岁。如果他没有英年早逝，现在一定名动天下。

陈华生死后，SNO 选出了新的领导者，他就是加拿大著名物理学家亚瑟·麦克唐纳（图 5.18）。


图 5.18　亚瑟·麦克唐纳

麦克唐纳本来是普林斯顿大学的教授。为了 SNO 这个项目，他于 1990 年放弃了世界顶级名校普林斯顿大学的教职，成了加拿大女王大学的教授。

1990 年 1 月 4 日，SNO 项目正式启动。为了装那 1000 吨的重水，项目组在矿井中建造了一个半径为 6 米的球形容器（图 5.19）。而为了放大中微子产生的微弱信号，球形容器内部还安装了 9600 个光电倍增管。



图 5.19 SNO 实验装置

在此后的 10 多年间，麦克唐纳干脆住在了萨德伯里市。为了与家人团聚，他每个周末都会从萨德伯里飞到金斯敦，周一再飞回去。此航线要在多伦多转机，所以麦克唐纳常去多伦多机场里的一家快餐店吃饭。由于去的次数太多了，后来有人竟误以为他就在那家快餐店工作。

2001 年，麦克唐纳的辛劳终于获得了回报。那年 6 月，SNO 项目发表了一篇文章，宣布他们发现了电子型中微子转化成了其他类型中微子的直接证据。

这样一来，太阳中微子消失之谜就迎刃而解了。太阳发出的全都是电子型中微子。在传播过程中，大概有 2/3 的电子型中微子转化成了缪子型中微子或陶子型中微子。由于戴维斯的实验无法探测后两类中微子，它测出的中微子数目只有理论值的 1/3，也就不足为奇了。换句话说，无论是太阳标准模型，还是戴维斯的实验，其实都是对的。

由于发现了太阳中微子，戴维斯获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖。由于发现了太阳中微子的振荡，麦克唐纳获得了 2015 年的诺贝尔物理学奖。

我们来做个总结。为了解释 β 衰变过程中能量不守恒定律的问题，泡利提出了著名的中微子猜想。他认为，在 β 衰变的过程中产生了一种质量极小又不带电的粒子，称为中微子；这种幽灵般的粒子带走了一部分能量，从而导致了能量不守恒的假象。泡利原以为中微子根本不可能被探测到，但后来关于中微子的探测却先后 4 次获得了诺贝尔物理学奖。1968 年，戴维斯首次发现了太阳中微子，

并且带来了太阳中微子消失之谜。2001 年，麦克唐纳首次发现了太阳中微子的振荡，并且破解了太阳中微子消失之谜。两人也分别获得 2002 年和 2015 年的诺贝尔物理学奖。

我已经讲了三个关于太阳的诺贝尔奖级话题：太阳光谱、太阳能量来源和太阳中微子。下一节，我要聊一个更接地气的话题：太阳活动对地球的影响。



万圣节太阳风暴为什么会让地球变得一片狼藉?

11 月 1 日，是西方的传统节日万圣节。在万圣节的前一天晚上，孩子们会装扮成各种妖魔鬼怪，挨家挨户地敲门要糖果。所以，这个节日其实更像是西方的儿童节，到处都是一片欢乐的景象。

不过 2003 年的万圣节就是另一番景象了。从那一年的 10 月中旬到 11 月上旬，各种怪事频频发生。本来只会出现在两极地区的极光，活动范围突然大幅增大，就连美国南部的得克萨斯州也能看到。几十上百颗地球卫星都受到不同程度的损毁，很多卫星都转入安全模式或干脆直接关闭。而住在国际空间站里的宇航员也多次临时取消任务，进入防护舱紧急避难。

太空中危机四伏，地面上也不太平。在长达一个月的时间里，全球通信经常受到严重干扰，全球定位系统的定位精度大幅降低。跨越极地地区飞行的航班出现了大面积的延误，很多航班甚至被直接取消。此外，世界各地的输电网络故障此起彼伏，大面积停电也成了家常便饭。

造成这一切乱象的罪魁祸首，就是著名的万圣节太阳风暴。

为了解释什么是太阳风暴，让我先从太阳黑子说起。顾名思义，太阳黑子就是太阳表面的一些黑色的斑点（图 5.20）。一般而言，太阳黑子的温度在 2700~4200℃之间，显著低于太阳表面的平均温度（约为 5500℃），所以它们才会看起来这么黑。

古代中国、希腊和罗马都留下了不少关于太阳黑子的观测记录。不过最早揭示太阳黑子本质的人，是我们的老朋友伽利略。前面说过，他是世界上第一个把望远镜指向太空的人。在经过仔细地观察以后，伽利略率先提出太阳黑子其实是太阳的一部分。

这个观点立刻引起了轩然大波。因为在中世纪，人们普遍相信神创造出来的太阳肯定完美无瑕。伽利略发现太阳本身存在黑色的斑点，这对创造出完美世界的神而言是一种亵渎。因此，一个叫席耐尔的教士跳了出来，宣称太阳黑子其实

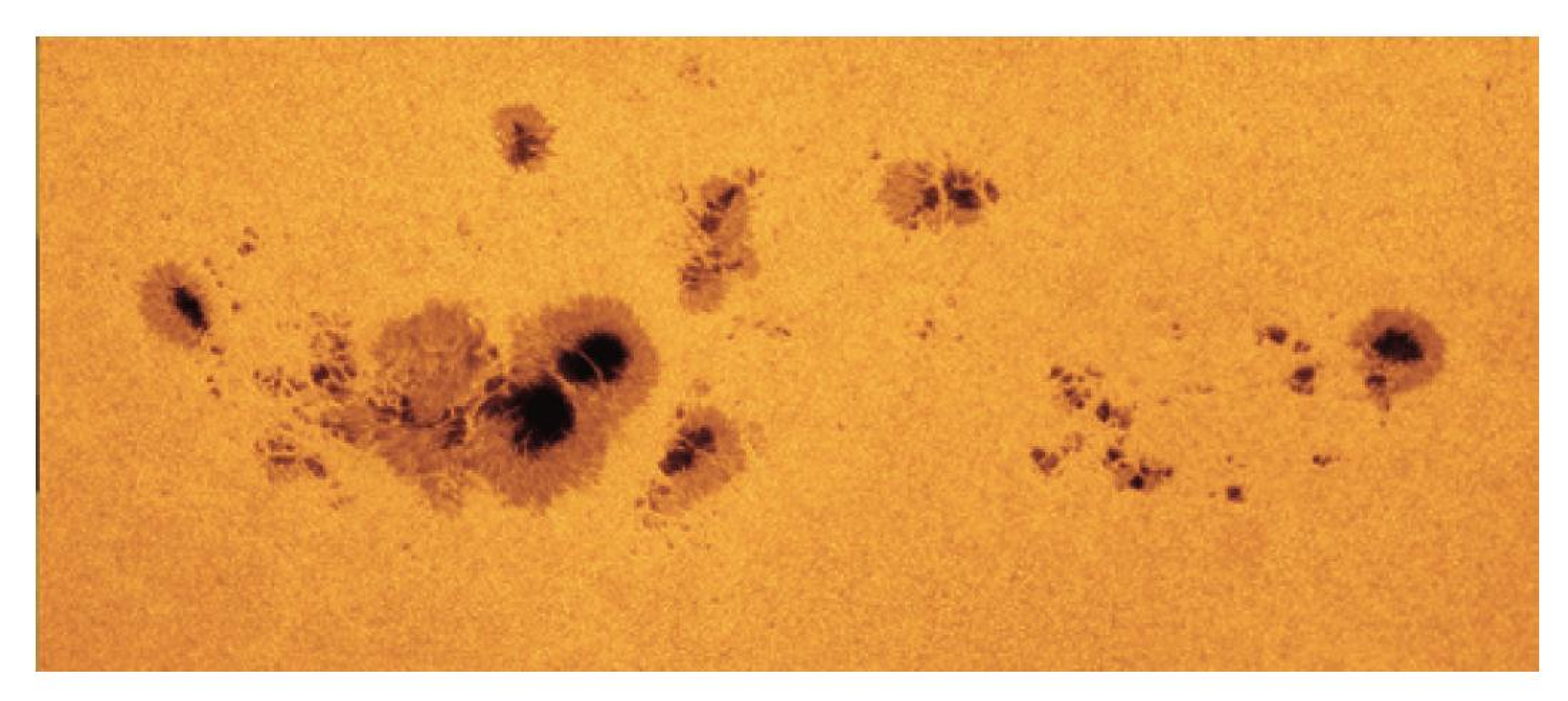


图 5.20　太阳黑子

是一些离太阳特别近的行星。当然，席耐尔很快就被能言善辩的伽利略批得灰头土脸。但伽利略因此得罪了一大批天主教人士，这也为他后来的悲剧埋下了伏笔。

言归正传。1843 年，德国天文学家海因里希・施瓦贝发现太阳黑子的活动存在一个平均长度为 11 年的周期。黑子数目最多的年份，称为太阳活动的极大年；黑子数目最少的年份，称为太阳活动的极小年。此外，黑子数目相对较多的那几年，称为太阳活动高年；黑子数目相对较少的那几年，则称为太阳活动低年。

现在已经知道，太阳黑子是太阳磁场活动的产物。有时候，太阳磁场会抑制太阳内部的能量传递。这样一来，受磁场影响的太阳表面区域的温度就会显著降低，从而产生太阳黑子。

你可以把太阳黑子当成是太阳上的火山。太阳的能量会源源不断地汇聚到太阳黑子的周围。事实上，太阳黑子的块头越大，它拥有的能量就越多。太阳黑子也会拉帮结伙，形成由多个黑子构成的太阳黑子群。而不同的黑子群又可以互相合并，形成规模更大的黑子群。显然，黑子群的规模越大，它积聚的太阳能量就越多。

就像火山一样，太阳黑子群最终也会爆发，把之前积聚的所有能量一次性地释放出来。而太阳黑子爆发将会引发一个极为剧烈的现象，那就是太阳耀斑（图 5.21）。

顾名思义，太阳耀斑就是太阳上突然变亮的斑点。说得具体一点，就是在太阳大气的局部区域发生了极为剧烈的爆发现象，进而向外界发出了能量巨大的电磁辐射。事实上，太阳耀斑发出的电磁辐射覆盖了电磁波的所有波段；从无线电

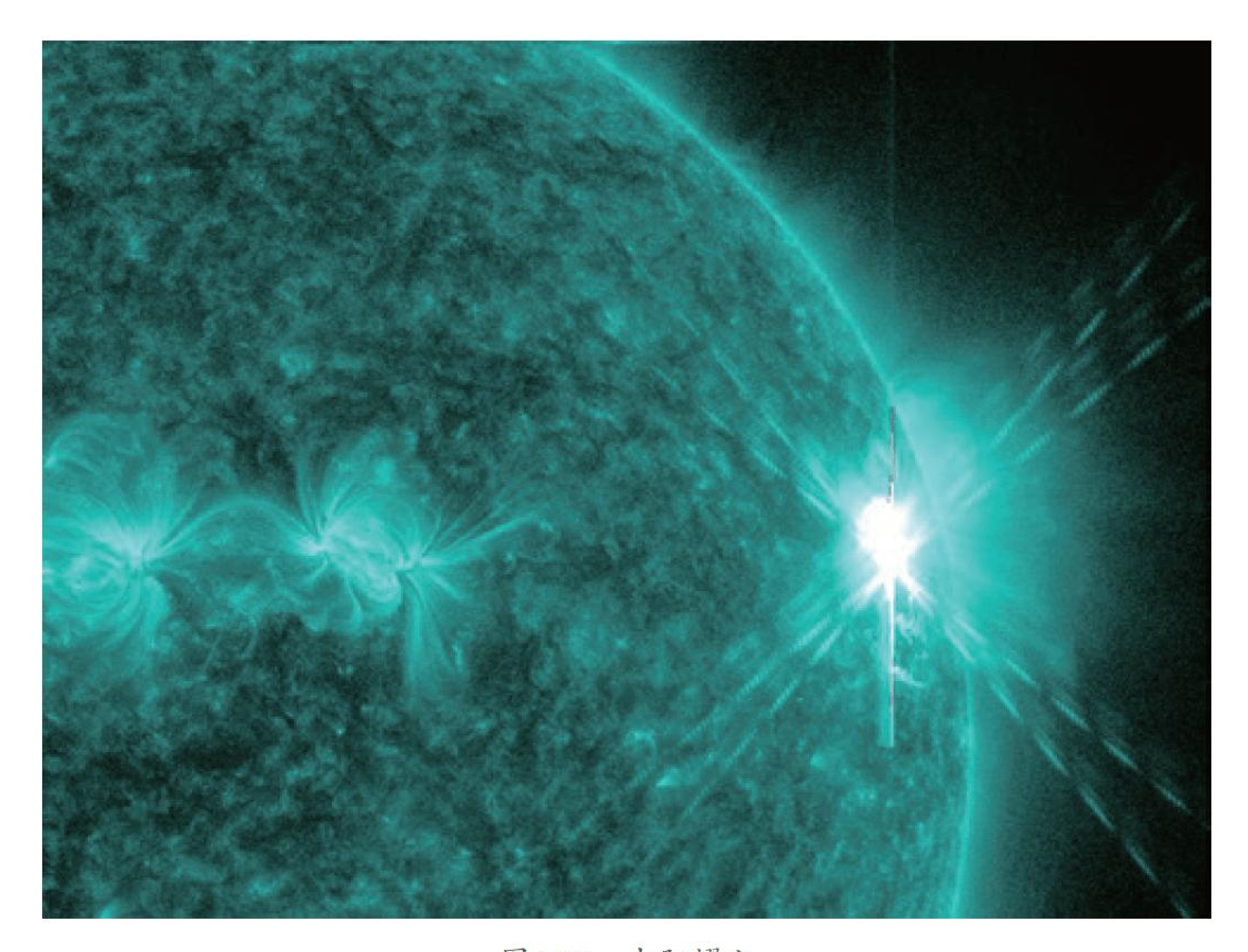


图 5.21 太阳耀斑

波到伽马射线，可谓应有尽有。由于太阳耀斑是由太阳黑子群喷发引起的，所以它总是会出现在太阳黑子群的上空。

将释放的最高能量按由低到高的顺序排列，太阳耀斑可以分成 5 个等级，分别是 A、B、C、M、X。每个等级的内部还可以用从 1 到 9 的数字来进一步细分，而数字反映的是不同耀斑能量相差的倍数。举例来说，A5 级耀斑的能量是 A1 级耀斑的 5 倍，B9 级耀斑的能量是 B1 级耀斑的 9 倍。当然，X1 级耀斑的能量是 M1 级耀斑的 10 倍。

观测表明，太阳耀斑所释放出的能量非常惊人。举个例子。一个 X1 级耀斑所释放出的能量，就相当于 100 亿颗氢弹同时爆炸。

除了太阳耀斑，太阳黑子爆发也常常引发另一个非常剧烈的现象，那就是日冕物质抛射（图 5.22）。

太阳大气的最外层是所谓的日冕层。日冕层主要由氢和氦这两种元素构成。它的温度极高，能达到上百万摄氏度。在这么高的温度下，氢和氦都被电离。也

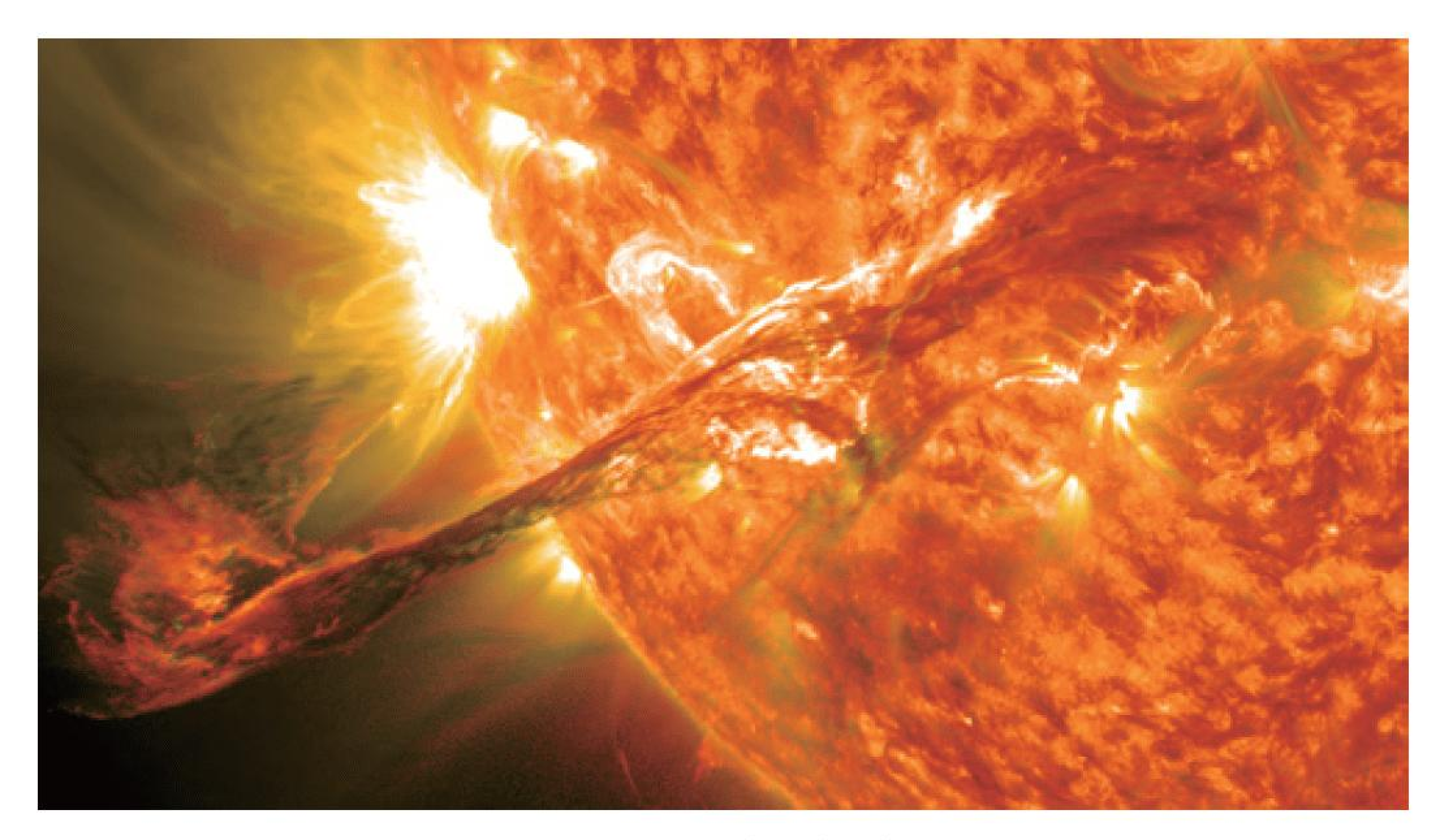


图 5.22　日冕物质抛射

就是说，根本不存在不带电的氢原子和氦原子，只剩下带正电的氢原子核、氦原子核，以及带负电的自由电子。

太阳黑子的爆发，有可能让日冕层受到扰动，从而把大量的日冕物质抛到太空中。这个现象就是所谓的日冕物质抛射。

为了说清太阳耀斑和日冕物质抛射的差异，我们可以做一个类比。在日常生活中，我们经常能见到暴风雨。暴风雨一般都包含两部分：闪电和雨水。其中闪电是电磁辐射，而雨水是物质粒子。你可以把太阳耀斑当成是太阳风暴的闪电，而把日冕物质抛射当成是太阳风暴的雨水。换言之，它们就是太阳风暴的两个不同的侧面。

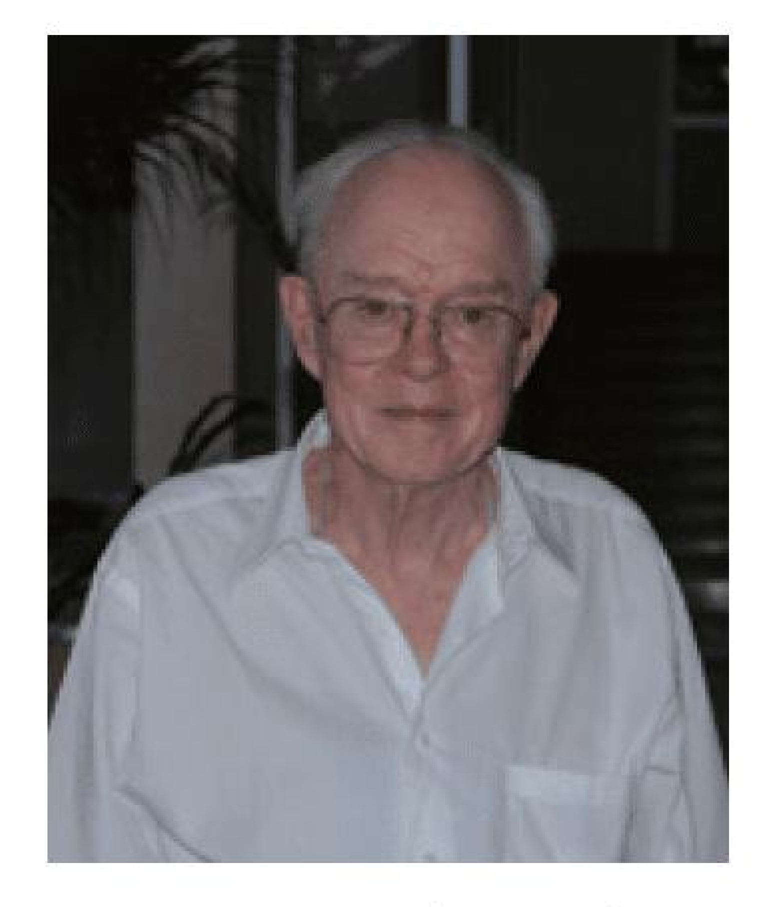


图 5.23　尤金 · 帕克

日冕物质（即处于电离状态的氢和氦）被抛射到太空中以后，会形成猛烈的太阳风。所谓的太阳风，其实就是太阳发出的高能带电粒子流。而最早提出太阳风这个概念的人，是美国著名天文学家尤金 · 帕克（图 5.23）。

1958 年，帕克发现日冕层的温度高到足以让部分日冕物质挣脱太阳强大的引力，以高能带电粒子流的形式进入星际空间。然后，帕克把这些高能

带电粒子流命名为太阳风。太阳风能解释很多自然现象，例如地球为什么会有极光，以及彗星为什么会有彗尾。

帕克把自己提出的这个太阳风理论写成了一篇论文，然后投给了《天体物理学杂志》。不幸的是，他遇到了两个特别凶恶的审稿人，用一些很不靠谱的理由把他的论文给拒掉了。

正常情况下，一篇论文被两个审稿人同时拒稿，就不可能发表了。幸好，帕克遇到了自己的伯乐，他就是《天体物理学杂志》的主编、著名天体物理学家钱德拉塞卡。钱德拉塞卡对帕克的论文非常欣赏，所以打破了必须让审稿人首肯的惯例，直接同意了帕克论文的发表。

事实也证明了钱德拉塞卡的眼光。几年后，天文观测证实了帕克的太阳风理论，从而让他在学术界一举成名。40 岁的时候，帕克就当选为美国科学院院士。

为了纪念帕克对太阳物理的贡献，NASA 把目前最新的太阳探测卫星命名为“帕克太阳探测器”（图 5.24）。这也是 NASA 历史上第一次用尚在人世的科学家来命名一个空间探测器。这个万众瞩目的太阳探测器，将首次飞入太阳的日冕层，从而完成与太阳直接接触的壮举。

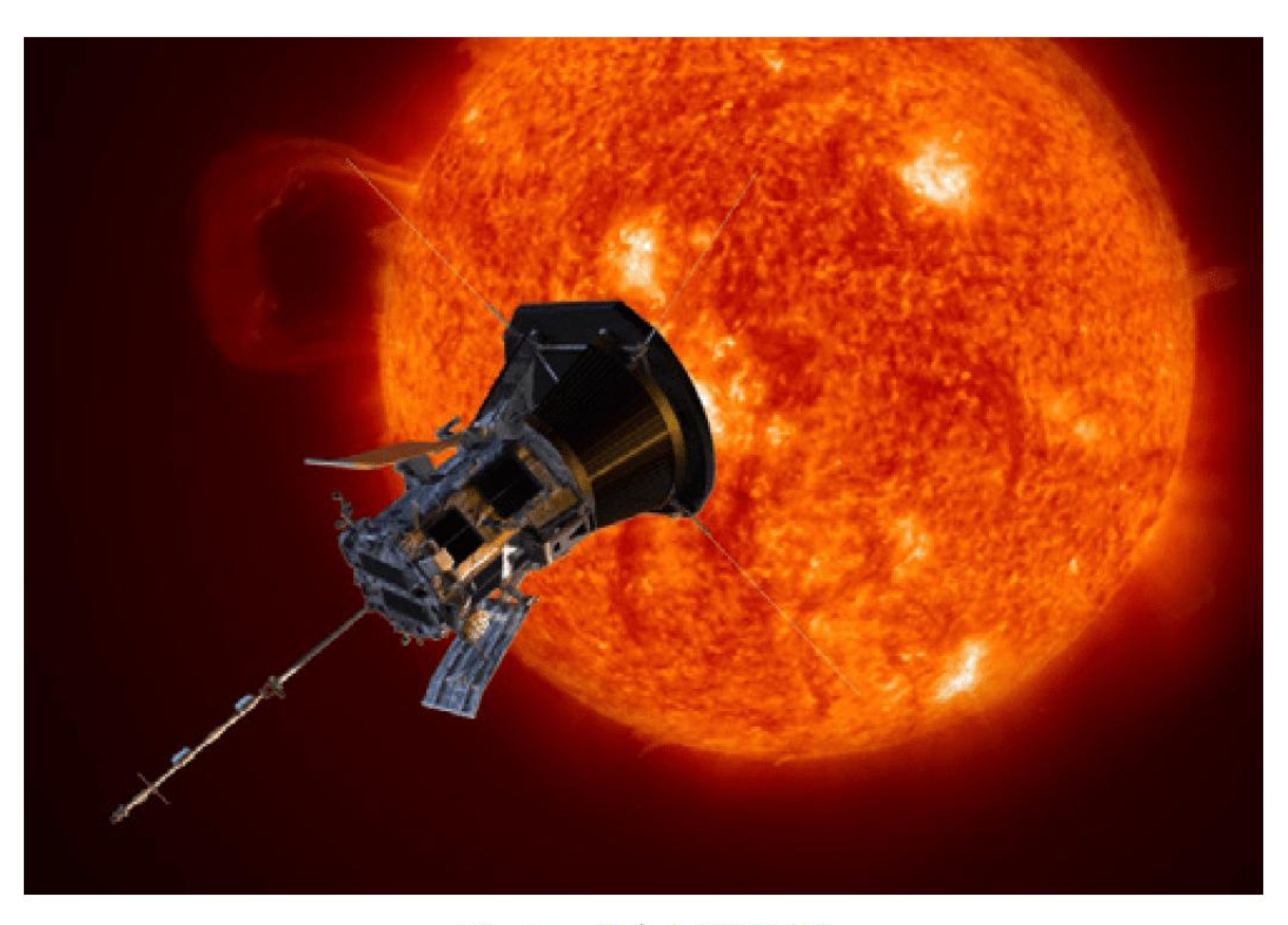


图 5.24 帕克太阳探测器

言归正传。知道了太阳黑子、太阳耀斑、日冕物质抛射和太阳风的概念，现在我们可以回过头去，聊一聊 2003 年的那场万圣节太阳风暴了。

平时，由于有地球磁场的保护，上面提到的这些太阳活动并不会产生多大的影响，最多就是在地球的两极地区制造一些极光。但要是太阳活动变得极为剧烈，情况就大不相同了。

就以万圣节风暴为例吧。在 2003 年万圣节前后的那一个月里，太阳耀斑总共爆发了 140 多次，日冕物质也抛射了 80 多次。在此期间，总共出现了 7 次强度达到 X 级的耀斑。而在 2003 年 11 月 4 日，更是出现了人类有观测记录以来的史上最强耀斑。这个耀斑的强度达到了惊人的 X45。换句话说，它在一瞬间释放出来的能量，相当于 4500 亿颗氢弹同时爆炸。此外，太阳风速也一度达到了惊人的 2000 千米 · 秒 $^{-1}$，是平时太阳风速的好几倍。

在这么恐怖的太阳风暴面前，地球变得一片狼藉就不难理解了。

可能你会问了:“将来有没有可能出现比万圣节风暴更恐怖的太阳风暴？”答案是，有。事实上，科学家目前已经发现了不少其他恒星的超级耀斑，其能量比那个 X45 级耀斑还大一万多倍。如果太阳也爆发出如此强的耀斑，足以直接剥离地球的大气层。

我们来做个总结。太阳磁场的活动，会在太阳表面产生太阳黑子。太阳黑子会拉帮结伙，形成太阳黑子群；此外，太阳黑子也会不断积聚太阳的能量，就像是太阳上的火山。最终，太阳黑子群会爆发，从而引发两个极为剧烈的现象：太阳耀斑和日冕物质抛射。前者会发出高能电磁辐射，堪称太阳风暴的闪电；后者会发出高能带电粒子流，堪称太阳风暴的雨水。高能带电粒子流进入星际空间后，就会形成太阳风。平时由于有地球磁场的保护，上述的太阳活动对地球不会有太大的影响。但要是太阳活动变得极为剧烈，例如出现 2003 年的万圣节太阳风暴，地球就有可能变得一片狼藉。



06

火星

6.1 火星为何已不再是日心说的梦魇?

离开了太阳，让我们前往这次太阳系之旅的第六站：火星（图 6.1）。



图 6.1　火星

质量：6.417×10^{23} 千克（地球质量的 10.7%）

体积：1.632×10^{20} 立方米（地球体积的 15.1%）

与太阳的平均距离：2.279×10^{8} 千米（日地距离的 1.52 倍）

火星是太阳系中第二小的行星。它的表面积约为地球表面积的 28%，还不如地球的陆地面积大。此外，它的质量也不大，大概只有地球质量的 10.7%。

火星是一颗红色星球，看上去荧荧如火；此外，它的位置和亮度也经常变化，让人捉摸不定。所以，古代的中国人就把它称为荧惑，并把它视为会带来各种灾

难的不祥象征。而在西方，火星的名声也很差。在古希腊和古罗马，人们把它称为战神之星，并认为它会带来战争、瘟疫与死亡。

除了在文化上的名声不好，火星在科学上也非常不祥。

很多中学教科书里都是这么说的："1543 年，哥白尼出版了《天体运行论》，书中提出了著名的日心说；它推翻了长期以来居于宗教统治地位的地心说，从而实现了天文学的根本变革。"

但事实上，这种说法并不准确。在日心说诞生后长达 60 年的时间里，它并没有对地心说构成任何实质性的威胁。罗马教廷甚至根本不屑于把《天体运行论》列为禁书，而只是把它视为一种奇技淫巧。在整个 16 世纪，《天体运行论》只被重印过两次。而同一时期介绍托勒密地心说的书，则被重印了不下一百次。事实上，就连作为日心说最狂热粉丝、一手促成《天体运行论》出版的雷蒂库斯，后来都不再关注日心说，转行去研究数学问题了。

可能你会问了："为什么日心说会如此不受待见呢？"答案是日心说本身还存在很严重的缺陷。其中最大的问题是，日心说无法准确描述火星的运动轨道。换句话说，在预测火星的未来位置方面，它的表现比托勒密的地心说要差得远。

原因其实很简单。当时的天文观测已经发现，就算火星真的在绕太阳旋转，它的运动轨迹也不会是日心说所预言的圆形。

哥白尼本人也意识到了这个问题。他甚至效仿托勒密，通过引入本轮和均轮的方法来解释火星诡异的运动轨道。但这样一来，日心说就失去它相对于地心说最大的优势：简单性。

因此，由于无法解释火星诡异的运动轨道，在长达半个多世纪的时间里，哥白尼的日心说一直都在被托勒密的地心说吊打。

这个局面，因为两个人的出现而发生改变。

第一个人，是丹麦著名天文学家第谷·布拉赫（图 6.2）。

第谷出生在丹麦的一个非常显赫的贵族家庭。20 岁那年，第谷在别人的婚礼上，与自己的一个堂兄大吵了一架；这场争吵，最后引发了一场轰动一时



图 6.2　第谷·布拉赫

的决斗。第谷在决斗中落败，并且被削掉了鼻梁。从此以后，他就不得不一直戴一个黄铜做的假鼻梁。

后来，第谷迷上了天文学。凭借自己发明的一些辅助肉眼观测的精妙仪器，他把天文观测的精度提升到了一个全新的高度。1572 年，第谷在仙后座的位置发现了一颗超新星，从而彻底推翻了亚里士多德提出的天界永恒不变的理论，这让他一举成名。而这颗超新星，后来也被人们称为“第谷超新星”。

1576 年，丹麦国王弗雷德里克二世送给了第谷一座岛，并资助他在那里建立了欧洲第一个大型天文台。这就是著名的天堡（图 6.3）。

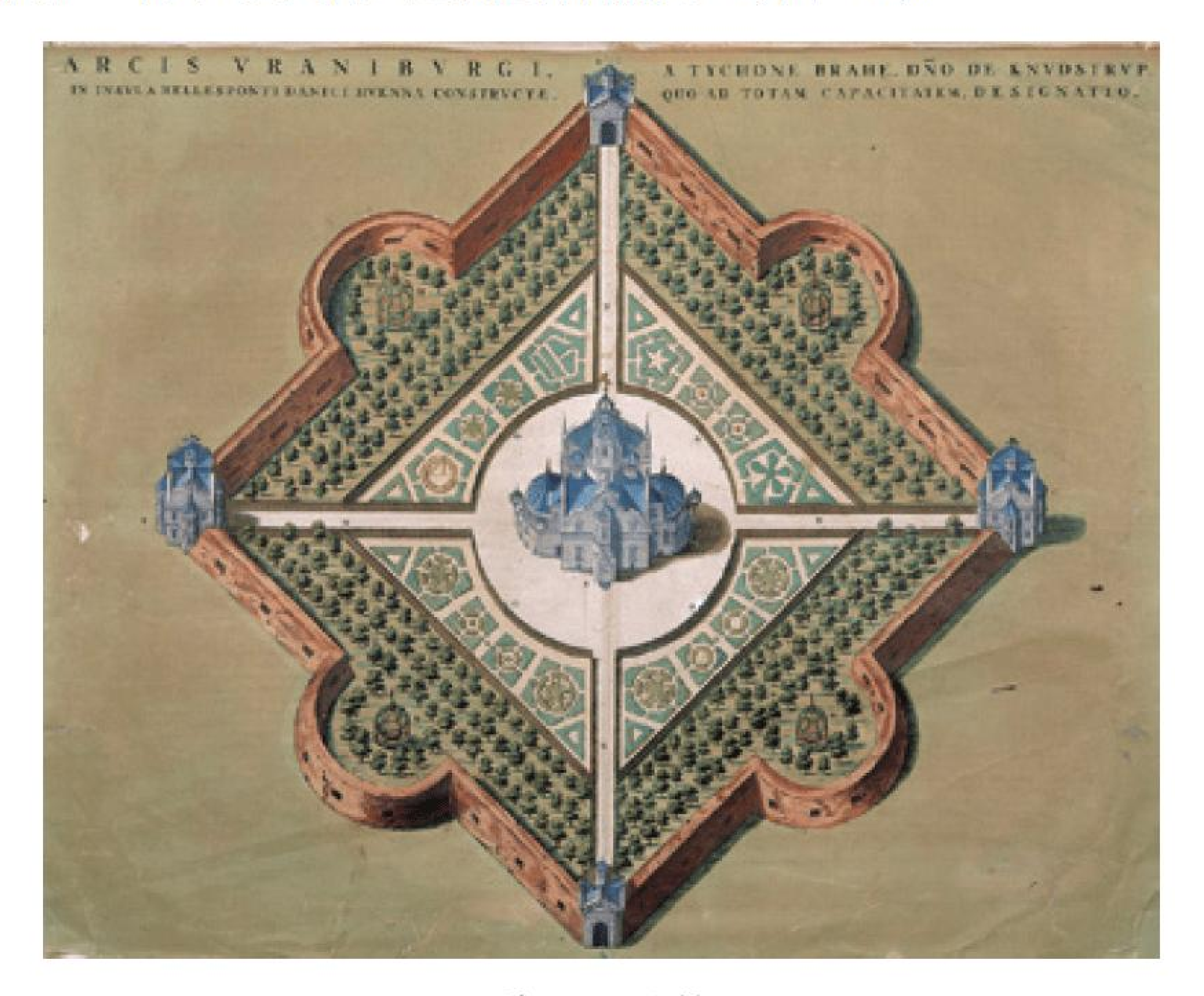


图 6.3　天堡

天堡是一座巨大的华丽城堡，里面设有造纸厂、印刷厂、图书馆、天文观测室、天文仪器制造厂以及非常舒适的生活配套设施。事实上，建造这个城堡的总费用超过了当时丹麦国民生产总值的 5%，这也让天堡成了历史上最昂贵的天文台。

天堡建成以后，就成了欧洲著名的旅游胜地。前来参观的社会名流可谓是络绎不绝。第谷也经常在天堡的花园里举办露天聚会，还专门雇了一个侏儒来给客人们讲笑话。

第谷对行星的运动非常感兴趣。经过长年的持续观测，他积累了大量关于行星运动的高精度观测数据。第谷也注意到了哥白尼提出的日心说，并被这个理论的简单性打动了；但与此同时，他又发现日心说无法解释火星诡异的运动轨道。为了解决这个问题，第谷于 1588 年提出了一个新的宇宙学模型，那就是图 6.4 所示的“第谷体系”。

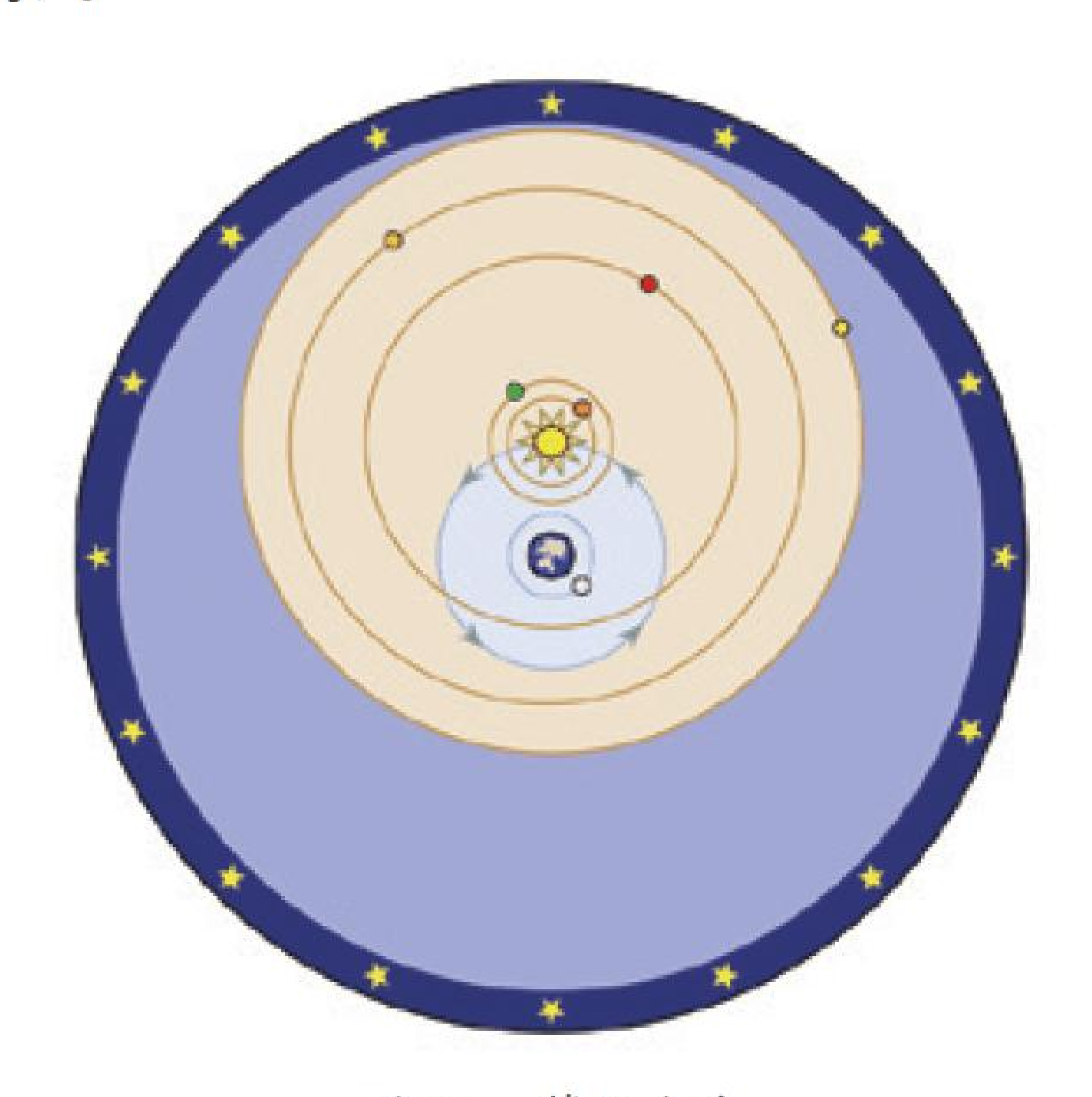


图 6.4　第谷体系

第谷体系是对托勒密地心说体系和哥白尼日心说体系的一种折中。在第谷体系中，地球依然静止在宇宙的中心，而月球和太阳都在围绕它作圆周运动。而与此同时，水星、金星、火星、木星和土星，又在围绕太阳作圆周运动。

但就在第谷提出这个新宇宙学模型的那一年，他的靠山（即弗雷德里克二世）因为酗酒过度而去世了。新的丹麦国王大幅削减了对天文台的财政支持，这让第谷的日子变得难过起来。好在 11 年后，第谷又找到了一个新的靠山，那就是神圣罗马帝国皇帝鲁道夫二世。

1599 年，第谷被聘为了神圣罗马帝国的皇家天文学家，并在布拉格城外的贝纳特津城堡建了一个新的天文台。第谷带去了他几十年积累下来的大量关于行星运动的高精度观测数据。在布拉格，他遇到了改变历史的第二个人。

历史常常会有一些惊人的巧合。1600 年 1 月 1 日，一个人离开了自己在格拉茨的家，启程前往布拉格。他其实是被迫逃离的。由于他是一名新教信徒，当


图 6.5　约翰内斯·开普勒

地的一个信奉天主教的权贵威胁要处死他。相信你已经猜到了，此人就是我们的老朋友约翰内斯·开普勒（图 6.5）。

与第谷截然不同，开普勒出身贫寒。他爸爸是一个雇佣兵，一直都过着刀口舔血的生活。在开普勒 5 岁那年，他爸爸外出打仗，然后就再也没能回来。

他妈妈是一个小客栈老板的女儿，所以开普勒从小就住在他姥爷的客栈里。作为一个早产儿，他一直都体弱多病。在他 4 岁那年，灾难降临。由于染上了天花，他的视力受到了损害，双手也出现了一定程度的伤残。

这种种不幸，让开普勒变成了一个极度自卑的人。长大之后，开普勒曾以第三人称的口吻这样描写自己的生活："他不断地寻求别人的好感，一切都仰仗他人，投他人所好；当他们痛斥他时他从不生气，反而要急着博取他们的青睐……他像狗一样，对浴缸、酊剂和乳液感到恐怖。"

幸好，这个自卑的人早早地找到了一个避风港，一个心灵的秘密花园，那就是天文学。18 岁的时候，开普勒考上了杜宾根大学，并在那里接触到了哥白尼的日心说。他很快就被这个简洁而优美的理论吸引，并成为日心说最坚定的拥护者。

1596 年，开普勒出版了《宇宙的奥秘》一书。在这本书中，开普勒尝试用几何学来改造哥白尼的日心说，进而解释为什么宇宙中会有 6 颗行星（当时只知道 6 颗）。因为这本书可以说是从头错到尾，所以我就不介绍此书的内容了。但正是这本错得离谱的书让命运的齿轮开始转动。

1597 年初，开普勒把他的书寄给了欧洲有名的几个天文学家，其中就包括当时还在丹麦的第谷。开普勒在书中展现出的深厚数学功底，给第谷留下了极深的印象。所以在第谷到达神圣罗马帝国以后，就给开普勒写了封信，邀请他到贝纳特津城堡来做自己的助手。

1600 年 2 月，开普勒抵达贝纳特津城堡。第谷马上指派他去研究火星的运动轨道。开普勒最初认为他只要花 8 天时间就可以解决火星轨道问题。但事实上，

他花了整整8年。后来，他把这段与火星轨道缠斗的经历比喻成了“与火星的战争”。

没过多久，开普勒就与第谷爆发了一场激烈的争吵。主要原因是，第谷打心底看不起出身卑微的开普勒，一直把他当成一个佣人来使唤。觉得自己人格受到侮辱的开普勒于当年 4 月离开了第谷的天文台。但由于开普勒找不到更好的工作，而第谷也找不到更好的助手，双方还是于 1600 年底达成了和解，开普勒也带着家人重返贝纳特津城堡。

重回天文台的开普勒面临着一个很大的障碍：第谷只肯向他提供关于火星的一小部分数据，而对自己多年积累的完整数据严加保密。这其实不难理解，第谷希望有一天能独自出版他的观测记录，而不愿与开普勒分享这份殊荣。但问题在于，想独吞所有功劳的第谷，本身却没有能力找出这些天文观测记录背后所蕴含的深层规律。

这就很尴尬了。开普勒有极佳的数学功底，但他无法得到行星运动的完整数据；第谷手握完整数据，但他没有能力找出其中所蕴含的深层规律。

又过了 10 个月，这个非常棘手的问题以一种完全意想不到的方式得到了解决。

1601 年 10 月的一天，第谷去参加一个贵族举办的晚宴。宴会上他喝了很多酒，膀胱胀得非常厉害。但作为一个极端看重礼仪的贵族，第谷说什么也不肯中途离席去上厕所。所以他就一直憋到宴会结束。没想到，这一憋竟然憋出了大问题。回家不久，第谷就开始发高烧，随后就陷入了昏迷；短短 10 天之后，第谷就去世了。

这个传奇人物，就这样因憋尿而死。而他的意外去世，为后来的一场波澜壮阔的科学革命铺平了道路。

第谷死后，开普勒就接替了他的职位，成了神圣罗马帝国的新任皇家天文学家。第谷多年来积累的那些精度极高的观测数据，也到了他的手里。

在经历了长达 8 年的“火星战争”以后，开普勒终于取得了重大的突破。

千百年来人们始终相信，圆是世界上最完美的形状。所以，上帝创造宇宙的时候，一定会使用完美无缺的圆形。换句话说，行星绕宇宙中心的运动轨道，一定得是圆形，或者是多个圆形（即本轮和均轮）的叠加。但开普勒发现，行星绕太阳运动的轨道其实是椭圆。

可能你会觉得奇怪了：“这听起来也没什么大不了的啊。为什么这么多年都没人发现呢？”答案是，就连问题最大的火星轨道，也非常接近于圆形。

要想描述一个椭圆到底多接近于一个圆，可以计算椭圆短轴与长轴之比。很明显，这个比值越接近 1，这个椭圆就越接近于一个圆。即使是与圆形相差最大的火星轨道，此比值也达到了 0.99566。换言之，火星椭圆轨道的短轴，只比它的长轴小了不到千分之五。

这意味着，在第谷的海量观测记录中，只有极少数的一些数据点才会与圆形轨道发生偏离。在 8 年的时间里，开普勒把这些数据点分析了不下 70 遍，才终于破解了火星运动轨道的难题。

1609 年，开普勒出版了《新天文学》一书，最早指出行星围绕太阳运动的轨道其实不是圆，而是椭圆。这样一来，日心说无法解释火星运动轨迹的难题就迎刃而解。与此同时，第谷体系也失去了其存在的意义。

1619 年，他又出版了《宇宙的和谐》一书，率先提出了著名的开普勒三定律。它们分别是：第一定律（椭圆定律）：行星绕太阳运动的轨道是椭圆，且太阳在此椭圆的一个焦点上。第二定律（面积定律）：行星与太阳的连线，在相同的时间内扫过的椭圆面积相同。第三定律（周期定律）：行星运动周期的平方，与其椭圆轨道长半轴的立方成正比。

我们在游览地球的时候已经说过，开普勒三定律的提出，为后来牛顿建立经典力学，进而实现物理学的第一次大统一埋下了伏笔。所以，开普勒现在已经被公认为有史以来最伟大的天文学家之一。

我们来做个总结。1543 年，哥白尼提出了日心说。但这个理论有一个很严重的缺陷：它无法准确描述火星的运动轨道。所以在长达 60 年的时间里，火星轨道问题一直是日心说挥之不去的梦魇。16 世纪末，经过几十年的持续观测，第谷积累了大量关于行星运动的高精度观测数据。1601 年，在第谷因憋尿而意外去世以后，这些数据落到了开普勒的手里。在经历了 8 年“与火星的战争”以后，开普勒于 1609 年出版了《新天文学》，最早指出行星围绕太阳运动的轨道其实是椭圆。1619 年，他又出版了《宇宙的和谐》，率先提出了著名的开普勒三定律。这也让他成为有史以来最伟大的天文学家之一。

除了火星诡异的运动轨道以外，还有一个关于火星的问题曾引起很多人的兴趣：火星上到底有没有水？

6.2 火星上到底有没有水?

我们在游览地球的时候就已经说过，水是生命之源。正是在液态水的环境中，包括蛋白质在内的各种有机大分子才能互相混合，进而通过各种化学反应来形成更复杂的结构，最终演化成真正的生命体。到目前为止，人类还没有发现任何一种生物能在没有水的情况下生存。所以，人类对火星上是否有水特别感兴趣，也就不足为奇了。

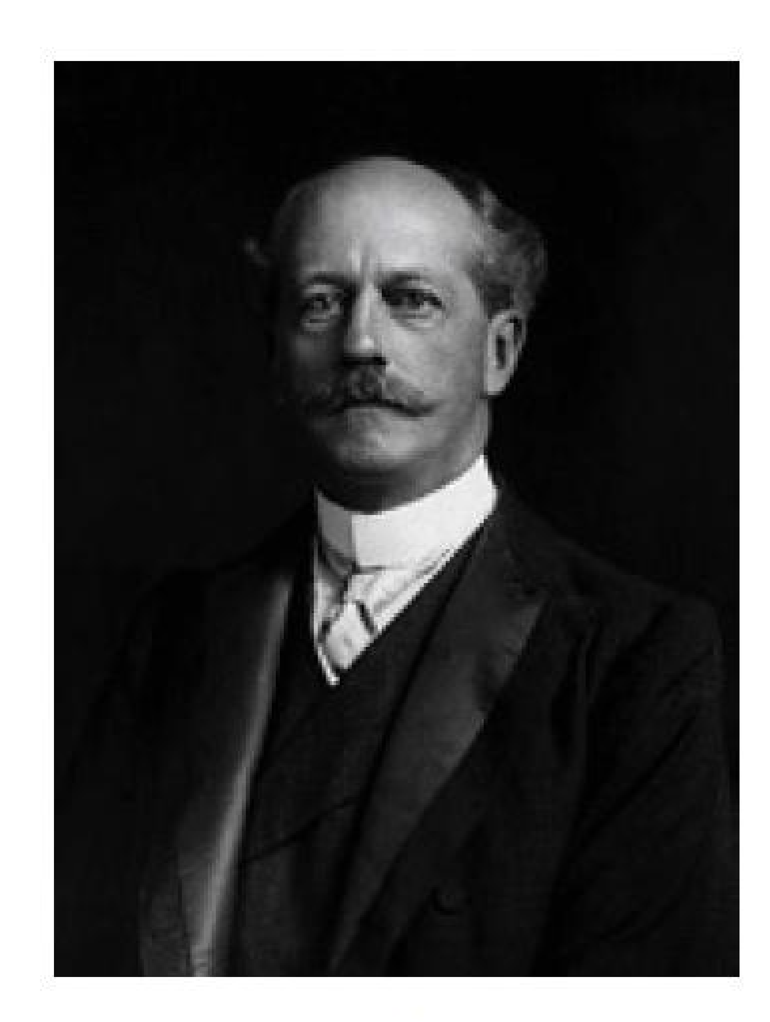


图 6.6 帕西瓦尔·罗威尔

早在 19 世纪末，就已经有人猜测火星上有水。其中的代表人物是美国人帕西瓦尔·罗威尔(图 6.6)。

罗威尔是那种典型的人生赢家。他出生在波士顿的一个非常富有的家族。从哈佛大学毕业以后，他花了 6 年的时间经商，并赚了不少钱。19 世纪 80 年代，觉得赚钱没意思的罗威尔弃商从政，跑到日本和韩国当了 10 年的外交官。在此期间，他以东方文化为背景，写了一系列富有异国情调的畅销书。这让他于 1892 年当选为美国艺术与科学院的院士。借此契机，罗威尔结识了很多美国科学界的名流，并且发现自己人生的挚爱其实是天文学。1893 年，罗威尔回到美国定居。1894 年，他在亚利桑那州弗拉格斯塔夫市的附近建了一个以自己名字命名的天文台，即罗威尔天文台。这也是世界上第一个建在高山上的天文台。

罗威尔一生中有两大夙愿，其中一个是找到火星人。在此后的 15 年间，他一直用罗威尔天文台的望远镜来观察火星，还写了 3 本关于火星的书。在这些书中，罗威尔自己脑补了一个特别科幻的画面：火星上遍布着纵横交错的运河，运河上航行着大量的商船，而商船上又有很多忙碌的火星人。这些书后来毁掉了罗威尔作为一个天文学家的声誉，也让他成了学术界的笑柄。

此后半个多世纪的时间里，由于无法近距离接触，火星上有没有水一直是一

个科幻问题。

直到 1964 年，NASA 的水手 4 号才成功飞越了火星，并且传回了第一张火星表面的照片。这张照片还被 NASA 作为礼物，送给了当时的美国总统林登 · 约翰逊（图 6.7）。通过研究水手 4 号发回来的照片，科学家们宣布火星的表面很像月球，看不到任何存在液态水的迹象。因此，火星就被人们视为了一个毫无生机的不毛之地。



图 6.7　水手 4 号传回的第一张火星照片



图 6.8　斯卡曼德洛斯河谷

但到了 1971 年，情况发生了戏剧性的反转。NASA 的水手 9 号成功进入了环绕火星飞行的轨道，并拍了很多关于火星地表的清晰照片。其中一张照片展示了一个相当独特的地貌，看起来像一个被水冲刷而成、但现在已经干涸的河谷。这个后来被称为斯卡曼德洛斯河谷（图 6.8），就是火星上曾经存在液态水的第一个间接证据。

至于直接证据，则要一直等到 21 世纪。

2001 年，NASA 发射了火星奥德赛号探测器，对火星的地表进行了地毯式的搜索。正是这次搜索，在火星的北极地区发现了大量的冰。这样一来，火星上有固态水就成了板上钉钉的事实。

而在 2003 年，美国启动了火星漫步者计划。这个计划把两辆著名的火星车（图 6.9），勇气号和机遇号，送上了火星。通过对着陆地点的地下土壤进行分析，这两辆火星车发现了一个惊人的事实：火星上曾经存在过一个湖泊和一个海洋。这个发现被《科学》杂志评为了 2004 年的十大科学突破。



图 6.9 火星车

现在人们已经达成共识，火星上曾经有大量的水，甚至像地球一样拥有过海洋。图 6.10 就是 NASA 基于火星地质资料所重构的火星在 40 亿年前的样子。

现在问题来了。既然火星上曾经拥有过海洋，那么现在为什么会变成了一个宛如月球的不毛之地？我们不妨客串一次侦探，来好好地调查一番。

我们首先想知道的是，火星上的液态水是怎么消失的？答案是，有一部分凝固成了冰，另一部分则蒸发成了水蒸气。我们以前讲过，地球大气层是阻止水蒸气逃逸的关键所在。由于火星大气层极其稀薄（大气压只有地球的 1%），这些水蒸气能畅通无阻地逃逸到太空中。久而久之，火星表面的水就蒸发殆尽了。

我们要继续追问了，为什么火星大气层会如此稀薄？答案是，全被太阳风刮跑了。我们以前讲过，太阳日冕物质抛射会产生太阳风。这些高能带电粒子进入火星大气层后，会把自身的能量传递给火星的大气分子，从而使它们得以挣脱火星引力的束缚而逃逸到太空中。NASA 于 2014 年发射的马文号探测器发现，太

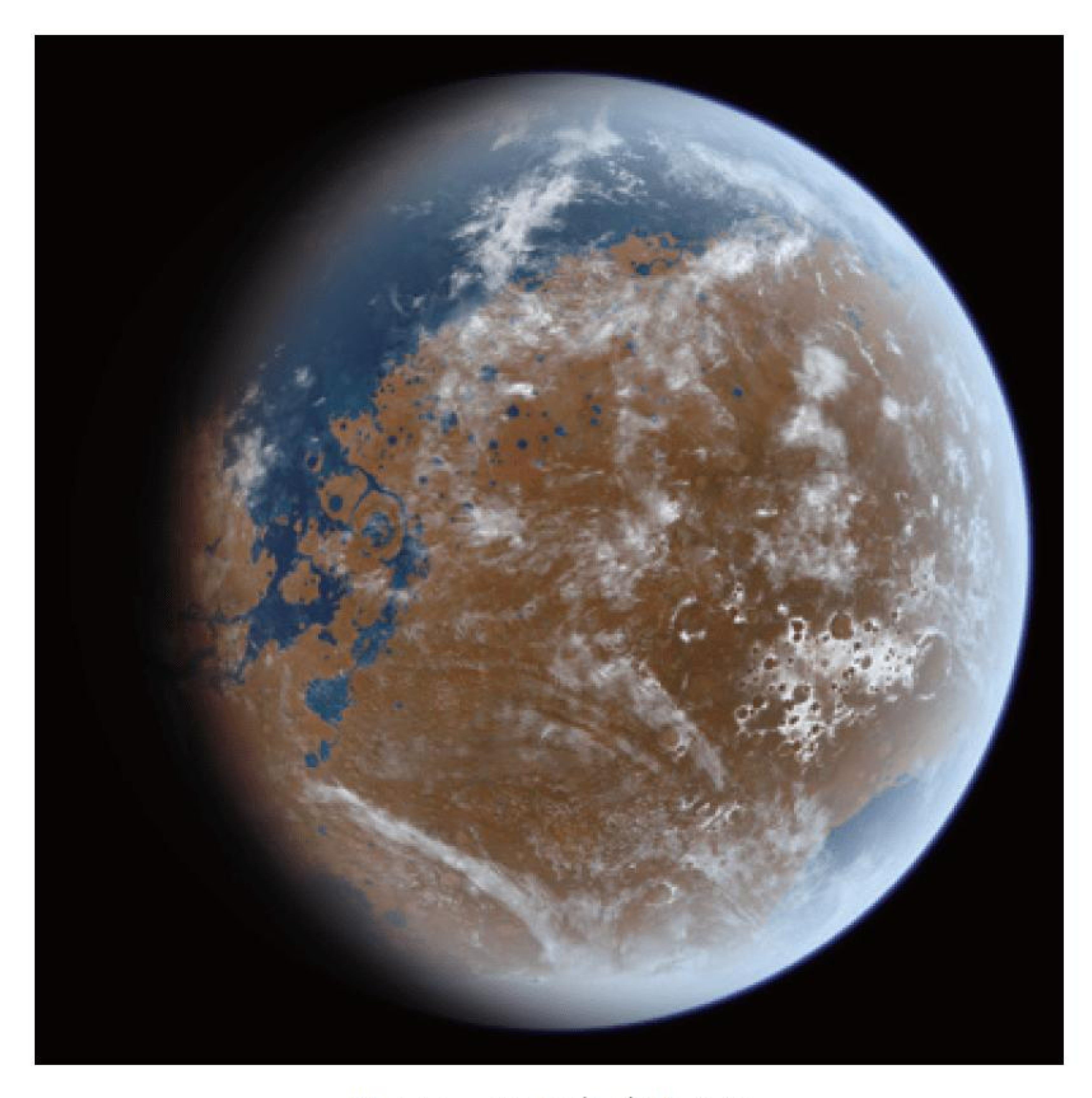


图 6.10 40 亿年前的火星

阳风目前仍在以 100 克 · 秒 $^{-1}$ 的速度剥离火星大气。经过几十亿年的日积月累，火星大气层自然就消失殆尽了。

还有一个问题，为什么地球能安然无恙，火星却被折腾成了今天的惨状？答案在我们游览地球的时候就已经讲了。地球拥有一个强大的磁场，从而构成了一个天然的屏障，让构成太阳风的高能带电粒子在进入地球大气层之前就发生了偏转。换句话说，地球的磁场阻止了太阳风的入侵。火星就没有这么幸运了。火星的质量只有地球质量的 10.7%，这让它的散热速度变得非常快。因此，火星内部很快就冷却了下来，这让火星失去了它的磁场。没有了磁场的保护，自然就无法再阻止太阳风的入侵了。

我们来做个总结。从 19 世纪末开始，人类就一直想知道火星上到底有没有水。在经过 100 多年的探索以后，科学家终于利用勇气号和机遇号这两辆火星车，确认了火星上曾经存在过海洋。事实上，火星液态水的消失，很像是一连串倒下的

多米诺骨牌。火星内部冷却，让火星磁场消失，从而使火星大气层被太阳风剥离，进而导致火星上的水蒸气逃逸到天空中，最后把火星变成了一个没有液态水的不毛之地。

2018 年 6 月 7 日，NASA 召开了新闻发布会，宣布了好奇号火星探测器的一个重大发现：它在火星上一个名为盖尔的撞击坑里打洞，然后发现了火星地表存在有机分子的确凿证据。因为有机化合物是构筑生命的基石，所以好奇号的发现让火星存在生命的可能性大幅增加。毫无疑问，在未来的数十年间，火星必然成为人类太空探索的焦点。下一节，我就来聊一个更热门的话题：火星是否适合人类移民。

6.3 人类有什么办法来改善火星的生存环境?

长久以来，人类一直梦想能够移民外太空。目前看来，最有可能的移民目的地无疑是火星。

前面说过，火星是一个没有液态水的不毛之地。除此以外，要想移民火星还必须克服一个巨大的困难，那就是火星上的温度太低。由于火星大气过于稀薄，几乎没有任何的温室效应，致使火星上的平均温度只有−63℃。显然，在这样的低温下，人类根本无法生存。

不过，也不是完全没有好消息。火星两极的冰盖中其实含有大量的冰和干冰。如果能想办法让冰盖融化，就可以释放出大量的水蒸气和二氧化碳。前面说过，水蒸气和二氧化碳都是温室气体，它们可以拦截火星本身发出的热辐射，从而让火星升温。而升高的温度又能进一步地融化冰盖，并释放出更多的温室气体，从而形成一个让火星升温的良性循环。

问题的关键在于，怎么才能让火星两极的冰盖融化?

有人提出了一个特别疯狂的想法：往火星的两极扔一大堆核弹。此人就是被称为“硅谷钢铁侠”的埃隆·马斯克（图 6.11）。



图 6.11　埃隆·马斯克

马斯克生于南非，9 岁那年父母就离了婚。作为一个不受欢迎的书呆子，少年时代的马斯克曾饱受学校霸凌。10 岁那年，他被一群男孩从学校楼梯上推了下来，然后在医院里住了两个月。12 岁的时候，他自学编程，并制作了一款后来卖了 500 美元的游戏。18 岁，他考入加拿大的女王大学，两年后转学到美国的宾夕法尼亚大学，并在那里获得了物理学和经济学双学位。24 岁，他进入斯坦福大学攻读物理学的博士学位，但入学后的第二天就主动退学了。

退学后的马斯克成了一个连续创业者。退学那年，他和自己弟弟一起，利用父亲赞助的 2.8 万美元创办了一家网络软件公司 Zip2；4 年后，这家公司被卖给了康柏公司，让 28 岁的马斯克获利 2200 万美元。紧接着，马斯克又与两位合伙人一起创办了一家在线金融服务公司 X.com；这家公司后来更名为 PayPal，并被易贝公司收购，这让马斯克又获利 1.8 亿美元。后来，马斯克又创办或收购了三家公司（太空探索技术公司、特斯拉公司和太阳城公司）。目前，马斯克的个人资产已达到 208 亿美元，位居《福布斯》杂志评选的 2017 年度最富有美国人的第 21 位。

但在传奇背后，马斯克也是一个非常冷酷无情的人。在创办特斯拉公司之初，马斯克就雇了一位女士做他的秘书。数年之后，这位女秘书就成了马斯克的左右手，每天都为他处理一大堆的事务。有一天，女秘书向马斯克提出她要加薪，因为她的薪水明显低于硅谷公司中与她拥有相同职位的人。马斯克是怎么回应的呢？他先以奖励为名，给这个女秘书放了一个月的带薪假期。在这一个月的适应期中，马斯克发现自己离开了秘书后也能应付公司的种种事务，所以就把度假归来的女秘书给解雇了。

马斯克是一个狂热的火星移民主义者。他还宣称自己要在火星上退休。为了融化火星两极的冰盖，马斯克在参加美国的一个脱口秀节目的时候，提出应该往火星的北极扔一大堆核弹。

马斯克认为，氢弹爆炸所释放的大量热量，能够让火星两极的冰盖融化，从而迅速增加火星大气中的温室气体，进而启动让火星升温的良性循环过程。

问题是，马斯克的方案靠谱吗？答案是否定的。

就以其中的一个漏洞为例吧。往火星上扔氢弹除了能炸出温室气体以外，还会炸出大量的尘埃；这些尘埃会长期漂浮在大气层中，严重阻碍太阳光到达火星的地表，从而导致火星地表明显降温。这就是所谓的“核子冬天”。

换句话说，马斯克的方案其实很不靠谱，只会偷鸡不成蚀把米。

其实除了往火星的两极扔核弹，人们也想出了一些其他的脑洞大开的方案。

举个例子。有人提出，可以在环绕火星飞行的轨道上建造大量的反射镜。这些反射镜像太阳帆一样，可以根据太阳光压的变化来调整自己的运动轨道，从而尽量停留在火星两极的附近。如果反射镜建造得足够多，就可以让太阳光汇聚在

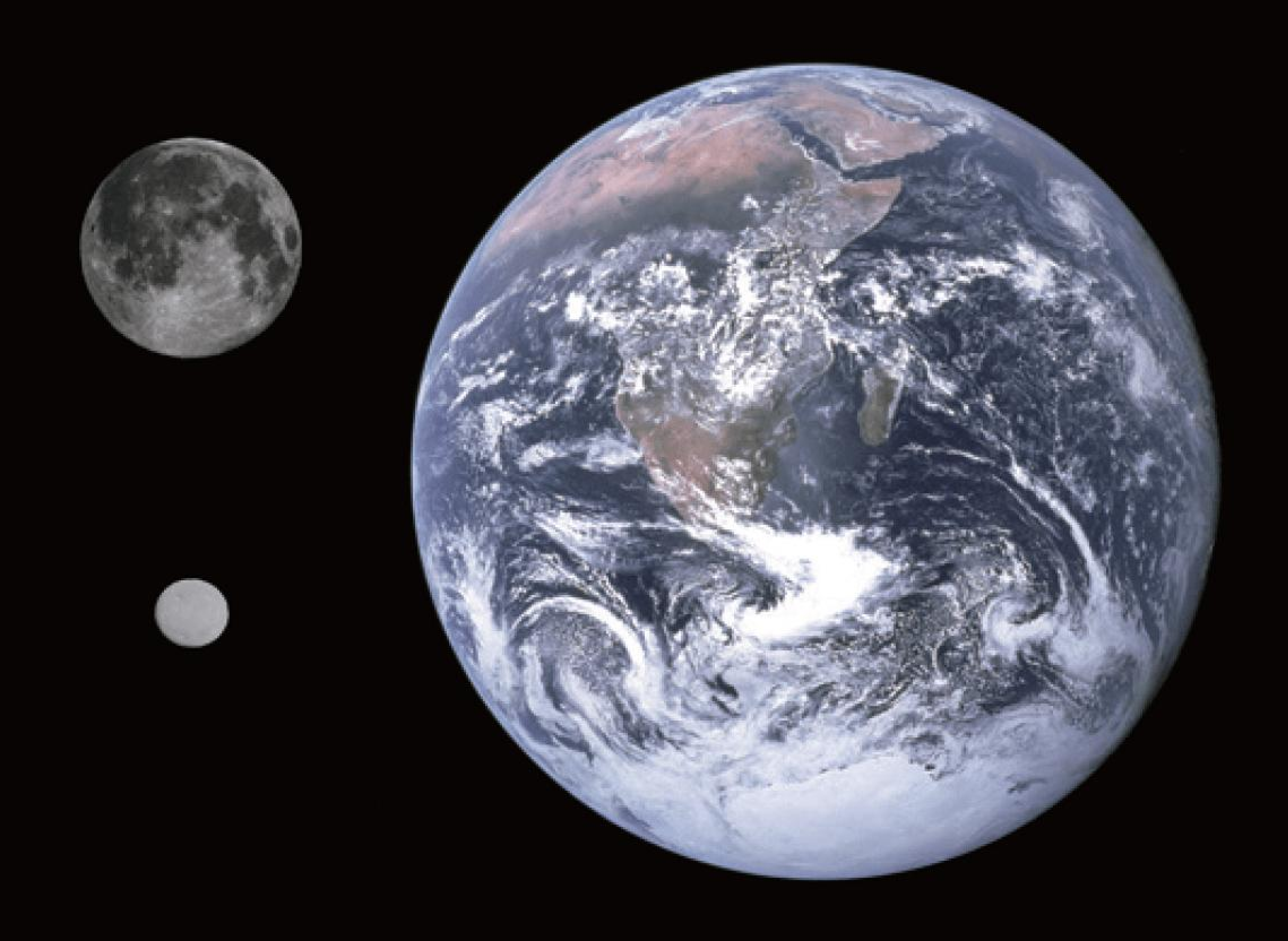
火星的两极，进而融化火星两极的冰盖。

此外，还有人提出，可以去火星的两个卫星上挖一些黑色的尘土，然后把它们撒在火星两极的冰盖上。就像黑衣服能吸热，黑色的尘土也能提高火星两极地区的温度，进而促成火星两极冰盖的融化。

很明显，以目前人类的技术水准而言，这些方法都属于天方夜谭。要想看到这些方法产生效果，恐怕还需要上百年的时间。

最后再多说几句。即使人类真能融化火星两极的冰盖，依然要面对一个非常严重的问题。前面说过，火星几乎没有磁场。换句话说，即使人类真的创造出了比较浓密的火星大气层，一样会被太阳风剥离。对于这个问题，人们还没有想出一个比较靠谱的解决方案。

我们来做个总结。人类要想移民火星，必须面对一个巨大的困难，那就是火星上的温度太低。而要想解决这个问题，关键在于如何才能让火星两极的冰盖融化。人们已经想出不少脑洞大开的方案，包括往火星的两极扔核弹、在火星轨道上建造反射镜以及把火星卫星上黑色的尘土撒在火星上。但实际上，人类离能够有效改造火星环境的那一天还非常遥远。



07
小行星世界





7.1 谷神星如何变成太阳系第一个失去行星地位的天体?

离开了火星，让我们前往这次太阳系之旅的第七站：小行星世界（图 7.1）。

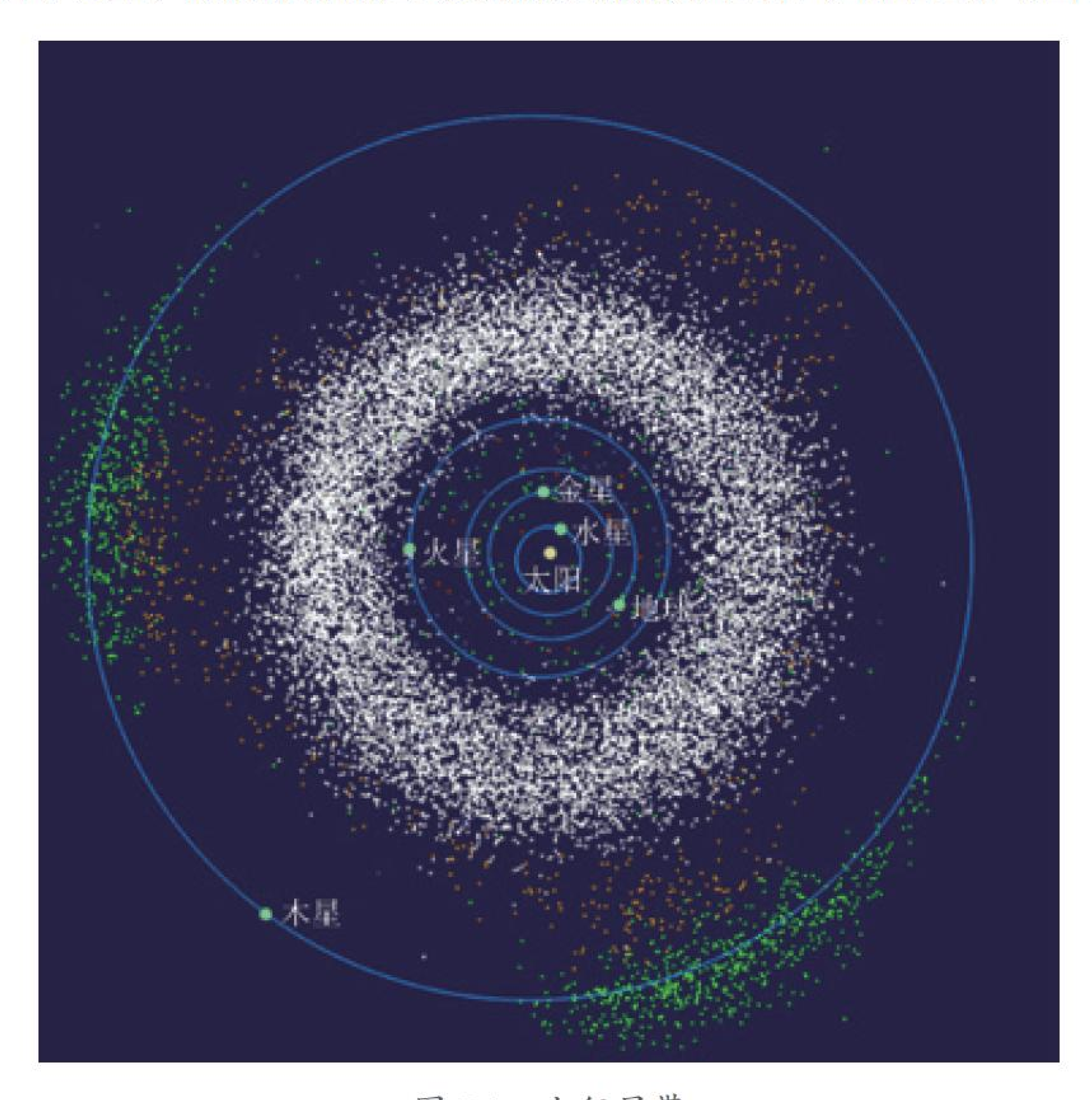


图 7.1　小行星带

总质量：3.0×10^{21} 千克（地球质量的 0.05%）

与太阳的平均距离：日地距离的 2.2~3.2 倍

在火星与木星轨道之间，有一个圆环状的区域，其中包含着超过 70 万颗大小不一的小行星，这就是所谓的小行星带。关于小行星带，让我从人类发现它的历史讲起。

我们游览火星的时候说过，开普勒于1596年出版了《宇宙的奥秘》一书。在这本书中，他注意到了一个非常奇怪的现象：在火星与木星轨道之间存在着一个巨大的空隙。


图 7.2　约翰·提丢斯

1766年，德国天文学家约翰·提丢斯（图7.2）发现有一个简单的公式 $A=0.4+0.3\times2^n$，能够描述太阳系诸行星与太阳之间的平均距离。其中的 A 就代表行星与太阳间的平均距离，其单位是一个天文单位，即1.5亿千米。$n=-\infty$、0、1、2、4、5的时候，分别对应于水星、金星、地球、火星、木星、土星。

你应该已经注意到了一件怪事：为什么没有 $n=3$ 的情况？提丢斯也提出了相同的疑问。他猜测在 $n=3$ 的时候，也就是距离太阳2.8倍天文单位的地方，应该还有一颗行星。不过，提丢斯并没有把这个发现写成论文发表，而只是把它写在了一本书的脚注里。这导致他的发现长期都不为人所知。


图 7.3　约翰·伯德

在不起眼的脚注里藏了6年之后，终于有人再次发现了这个公式，他就是右眼失明的德国天文学家约翰·伯德（图7.3）。伯德把这个公式写进了自己的一本颇有影响的新书，从而让它广为人知。此书第一次出版的时候，伯德对提丢斯只字不提，所以人们一直把伯德当成这个公式的发现者，并把此公式称为伯德定律。但此书再版的时候，伯德引用了提丢斯的工作。所以现在，人们已经把它改称为提丢斯－伯德定律。

发现提丢斯－伯德定律以后，伯德一直号召天文学界去 $n=3$ 和 $n=6$ 的地方寻找新行星。1781年，著名英国天文学家威廉·赫歇尔在 $n=6$ 的地方发现了太阳系的第7颗行星，即天王星。这坚定了人们的信心：在 $n=3$ 的地方，肯定不会空无一物。

但要再过整整20年，才会有人在 $n=3$ 的地方发现一个新天体。而发现这个新天体的过程本身就是一个非常传奇的故事。


图 7.4　朱塞普·皮亚齐

1801 年 1 月 1 日的晚上，意大利天文学家朱塞普·皮亚齐（图 7.4）像往常一样，拿出望远镜来观察星空。

他很快就注意到了一件不同寻常的事情：一颗“恒星”在天空中的位置发生了改变。第二天再观察的时候，这个天体的位置又变了，这让皮亚齐开始怀疑它是一颗新的行星。这个想法在第三天得到了确认，皮亚齐发现此天体的运动速度是固定不变的。更重要的是，它的运动速度比火星慢，又比木星快，所以应该位于火星和木星之间。


图 7.5　高斯

但皮亚齐还没高兴多久，倒霉的事情就发生了。在积累到足够的观测数据进而完全确定这个天体的运动轨道之前，皮亚齐就病倒了。等他恢复健康、重新回到望远镜旁工作的时候，这个天体已经绕到了太阳的背后，无法再观测了。

换句话说，用皮亚齐的观测数据，根本无法确定这个天体的轨道，也无法预言它将来会出现在哪里。这样一来，其他的天文学家就无法验证皮亚齐的观测是否正确；这意味着，这个发现将无法得到天文学界的认可。正常情况下，皮亚齐就要和这个重大发现失之交臂了。

幸好在这时，他的贵人登场了。此人就是德国数学王子高斯（图 7.5）。

和牛顿一样，高斯也有不喜欢发表研究成果的毛病。这个毛病害了不少人。举个例子。高斯的一位老朋友的儿子，名叫雅诺什·鲍耶。他花了好多年的工夫，终于证明了抛弃欧式几何的第五公设同样能得到完全自洽的几何学。鲍耶的父亲把自己儿子的论文寄给高斯，想听听他的意见。没想到高斯回信说：“我无法称赞贵公子，因为这等于是在吹嘘我自己。贵公子的工作，我 30 多年前就已经做过了。”不仅如此，高斯还指出鲍耶的论文中遗漏了一个很重要的问题。听到这个消息后的鲍耶大受打击，后来甚至渐渐放弃了数学研究。

言归正传。高斯想出了一种计算行星轨道的新方法，硬是用皮亚齐不太全的

观测数据，把这个天体的轨道给算出来了。后来，利用高斯算出来的轨道，德国天文学家奥伯斯于 1802 年重新找到了这个天体，并证明它确实处于火星和木星之间。这个失而复得的天体后来被称为谷神星（图 7.6）。

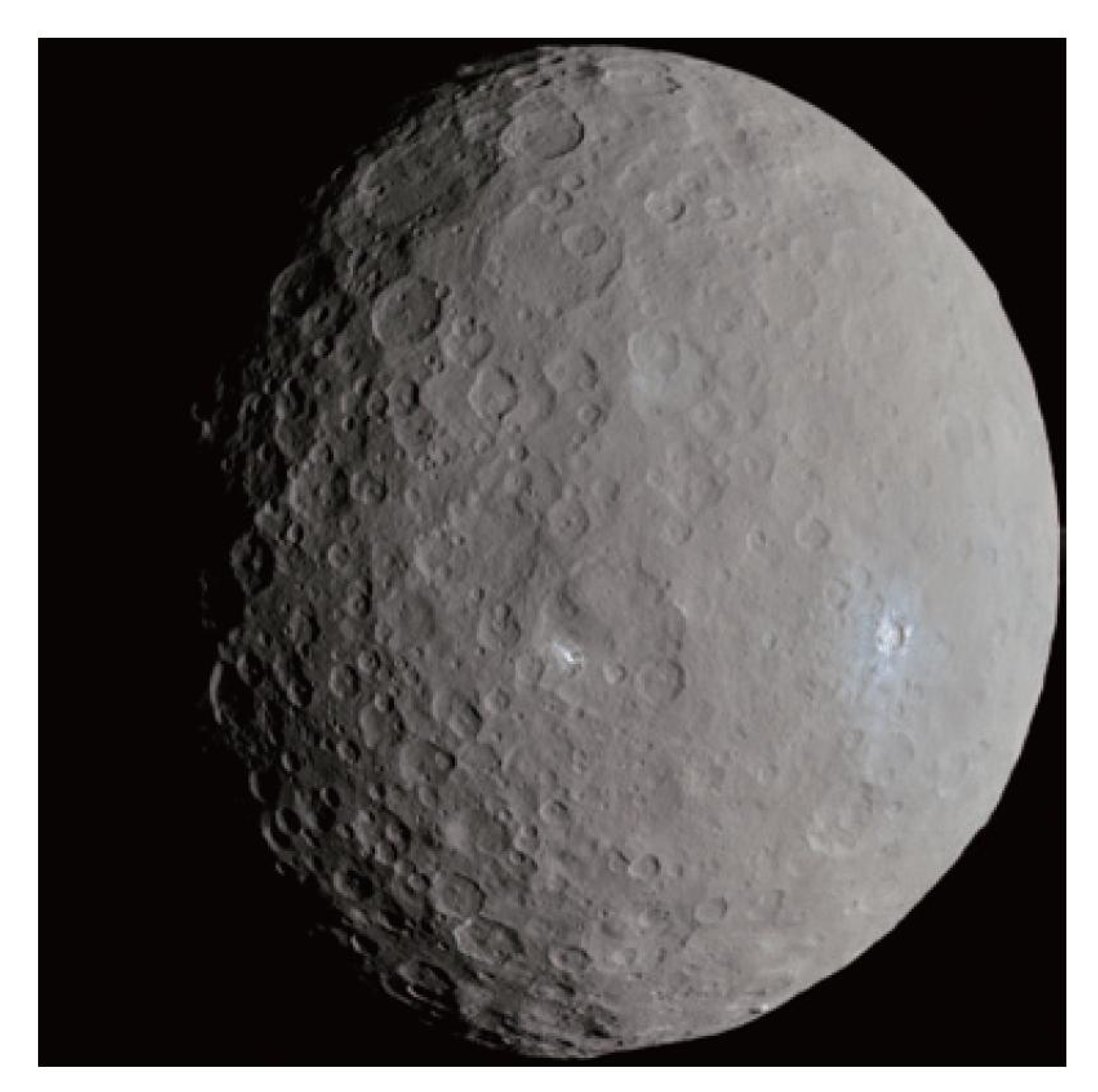


图 7.6　谷神星

谷神星的发现让天文学家们欢欣鼓舞：经过多年的搜寻后，终于在 n=3，也就是与太阳相距 2.8 倍天文单位的地方发现了这个伯德所预言的天体。很自然地，人们就把谷神星当成是一颗行星。

但没过多久，情况就发生了变化。1802 年，德国天文学家奥伯斯在离太阳 2.8 倍天文单位的地方发现了另一个天体，即智神星。不久后，第三个和第四个类似的天体，即婚神星和灶神星，也被人们所发现。尽管这三个天体的块头都比谷神星小，但还是让谷神星的行星地位发生了动摇。

后来，随着观测的不断深入，情况对谷神星也变得越来越不利。人们意识到，谷神星的块头其实非常小。根据今天的测量结果，它的直径只有区区 945 千米，其表面积大概和印度差不多。从图 7.7 就可以看出，它的块头甚至比月球还小了

一大截。所以问题就来了：月球也只能做卫星，那么块头比月球小一大截的谷神星能做行星吗?

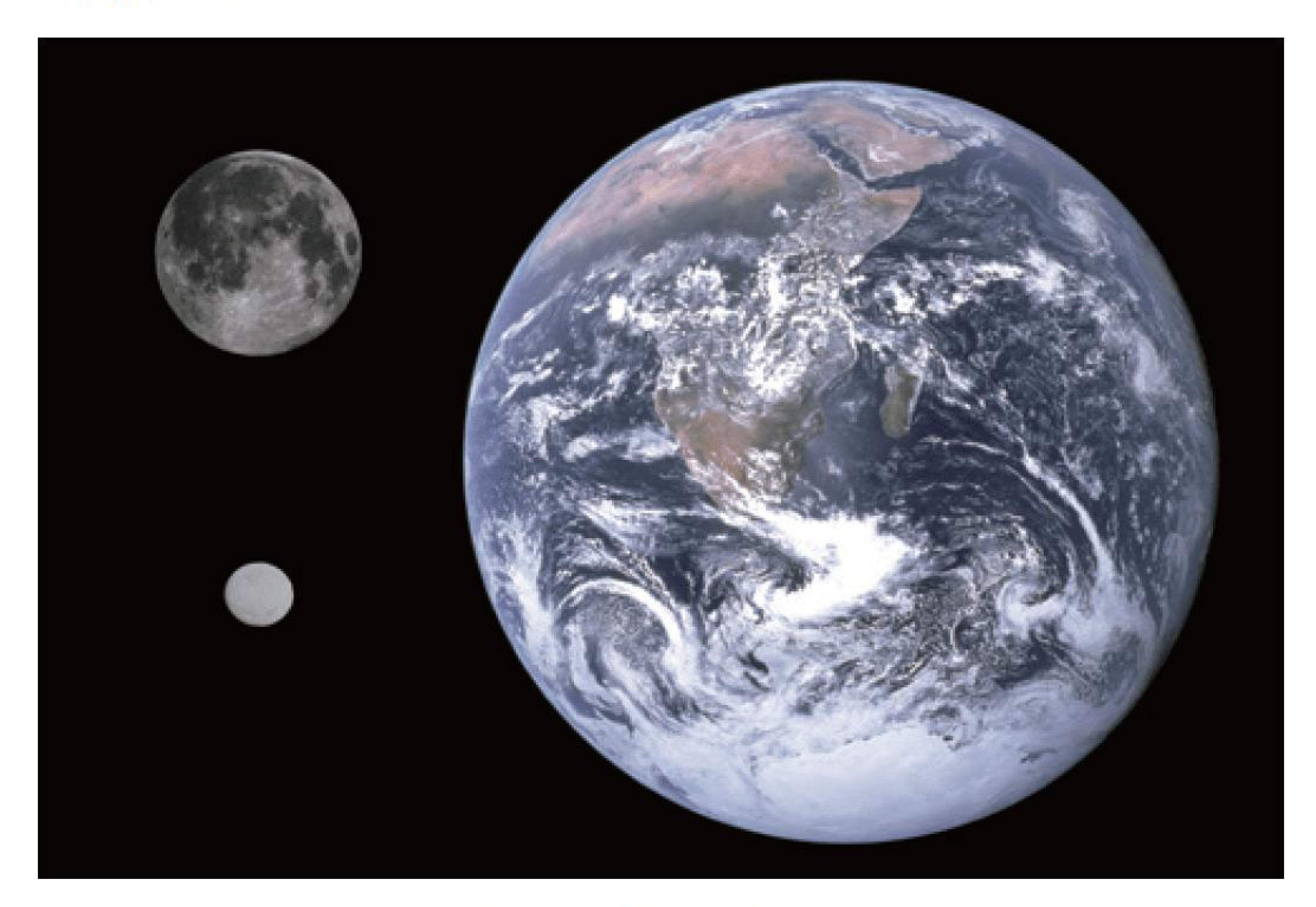


图 7.7　谷神星、月球和地球

天文学家的回答是否定的。19 世纪 50 年代，天文学界通过决议，把谷神星从行星的名单中剔除。他们把谷神星划进了一个新的类别：小行星。这样一来，谷神星就成了太阳系中第一个丢掉行星地位的天体。有趣的是，这并不是它唯一一次丢掉自己的身份。我们后面会讲到，进入 21 世纪以后，谷神星还会把小行星的身份也丢掉。

我们来做个总结。17 世纪六七十年代，德国天文学家提丢斯和伯德预言在与太阳相距 2.8 倍天文单位的地方，应该存在一颗新行星。1801 年，皮亚齐率先找到此天体的踪迹；但由于中途病倒，他差点与这个重大发现失之交臂。幸好高斯想出了一种计算行星轨道的新方法，硬是用不太全的数据算出了此天体的轨道，谷神星才失而复得。最初，人们都把谷神星当成一颗行星。但后来，天文学家发现在与太阳相距 2.8 倍天文单位的地方，还存在着其他的天体；此外，人们发现谷神星的块头非常小，甚至比月球还小一大截。所以，19 世纪 50 年代，天

文学界通过决议，把谷神星划进了小行星的类别。这也让谷神星成了太阳系中第一个丢掉行星地位的天体。

2007 年，NASA 发射了第一个专门用于探测小行星带的空间探测器，即黎明号小行星探测器。除了谷神星以外，它也造访了小行星带上的另一颗小行星，并在那里发现了让人大吃一惊的事物。

7.2 为什么太阳系第一高峰会坐落在不起眼的灶神星上?

离开了谷神星，让我们前往黎明号去过的另一颗小行星，那就是灶神星（图 7.8）。

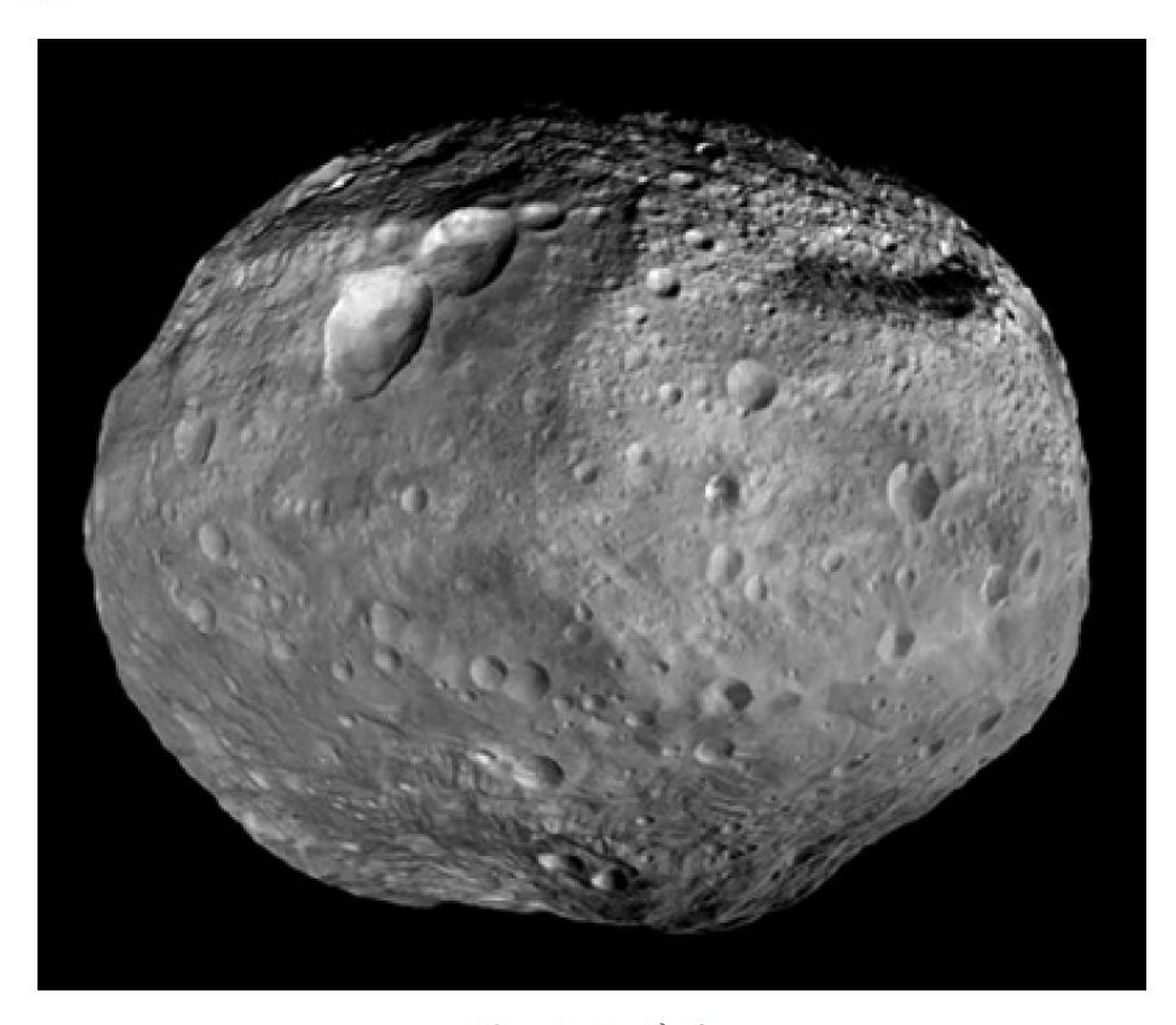


图 7.8 灶神星

前面我们其实已经提到过灶神星了。它是由德国天文学家奥伯斯在 1807 年发现的，同时也是人类在小行星带中发现的第四个天体。事实上，它是小行星带中第二大的天体，其质量约占小行星带总质量的 9%。此外，它的表面积相当于巴基斯坦的国土面积。

与我们前面游览过的所有天体都不同，灶神星是一个椭球体，而并非球形。为什么只有它不是球形呢？下面，我就来解释其中的奥秘。



图 7.9 平坦的水面

让我们从一个最简单的场景说起。想象你在往一个玻璃杯里倒水。停止倒水后一段时间，这杯水彻底静止下来，此时它的水面会呈现出怎样的特征？显而易见，水面肯定是平坦的。这是因为，如果水面还高低起伏，那么高出来的那一部分水就会由于自身重力而下沉，从而对旁边的水施加压力，让这杯水无法静止下来。换句话说，要想使一杯水保持静止的状态，它的水面就必须是平坦的。这个能让液体保持静止的状态，就是所谓的流体静力学平衡。

现在让我们想象一个悬在太空中、完全由水构成的巨大天体。现在要问的是，当这个“液态天体”处于流体静力学平衡状态的时候，它会是什么形状？答案是，它只能是球形。这是因为，如果这个天体不是球形，就肯定会有一部分水离这个天体的中心更远。这样一来，这部分水就会由于自身重力而下沉，让整个“液态天体”都无法达到平衡的状态。也就是说，要想让一个“液态天体”达到流体静力学平衡，它的形状就必须是球形。

明白了流体静力学平衡的概念以后，现在我们可以来聊聊真实的天体了。我们前面游览过的那些天体，除了本身就有流体性质的太阳以外，全都是以岩石为主要成分的岩质天体。但事实上，如果受到了过大的压力，就连岩石也会被“液化”，并且像液体一样向下坍塌。这意味着，如果岩质天体的质量足够大，它就能对岩石施加足够大的压力，从而使其“液化”。在这种情况下，岩质天体就会和“液态天体”一样，必须先变成球形，然后才能达到流体静力学平衡。

我们前面游览过的所有天体都具有足够大的质量。因此，它们要想达到平衡，就必须变成球形。

而灶神星不同。它的质量没有大到足以将自身的岩石完全“液化”。这样一来，它即使不变成球形，也能达到平衡状态。这就是为何只有灶神星是椭球体的原因。

事实上，灶神星恰好是一个分水岭。比它稍大一点的天体，全都变成了球形；而比它再小一点的天体，全都变得奇形怪状。

按人们最初的想法，灶神星应该是一个并不起眼的地方。但是 2011 年，黎

明号却在灶神星上发现了让所有人都跌碎眼镜的事物。

众所周知，地球上的最高峰是珠穆朗玛峰，其高度是 8844 米。但要是放眼整个太阳系，珠穆朗玛峰就完全排不上号了。

很长一段时间，人们都认为太阳系第一高峰是火星的奥林匹斯山（图 7.10）。这是一座典型的盾状火山。它的高度约为 21 900 米，差不多是珠穆朗玛峰的 2.5 倍；但由于其占地面积接近整个法国，坡度其实非常平缓，以至于你都无法察觉到自己是在爬山。

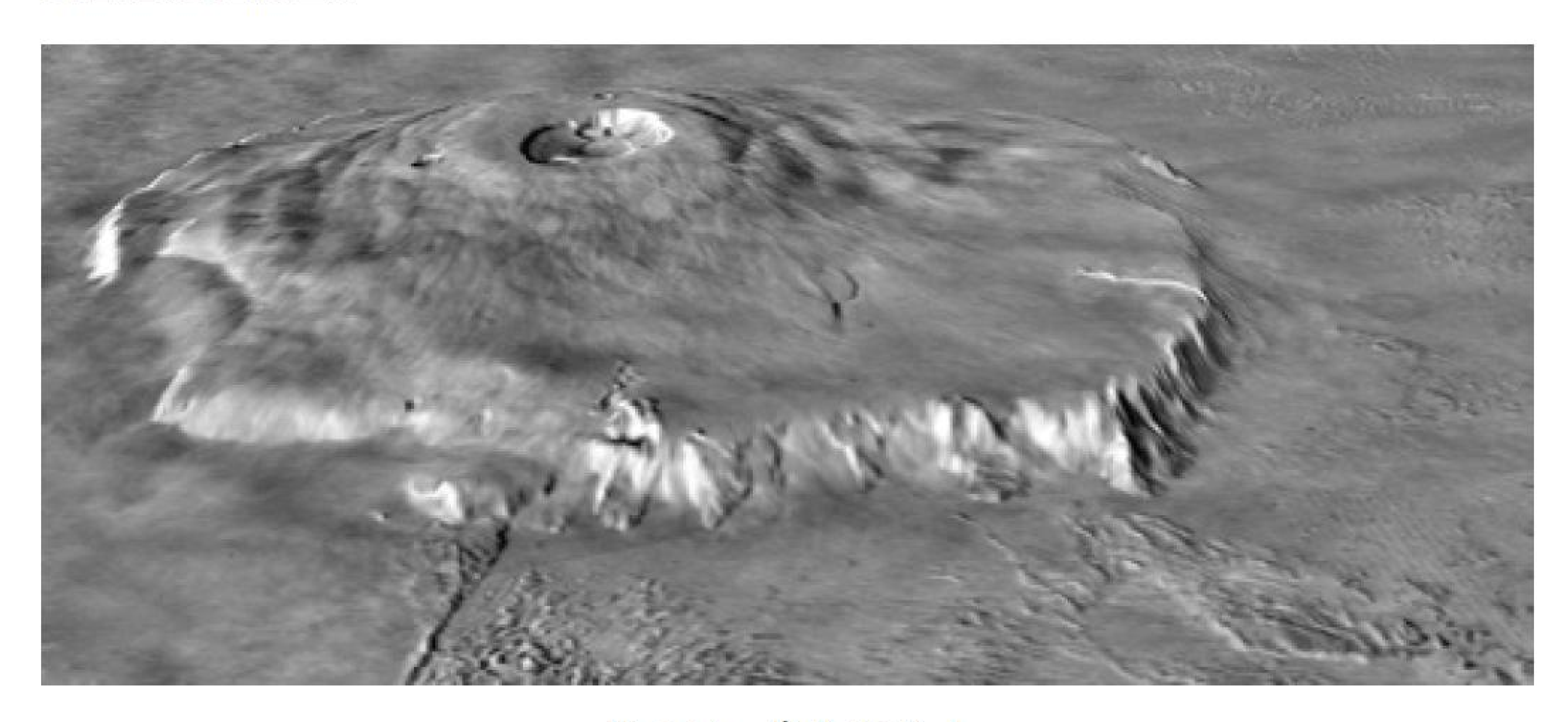


图 7.10　奥林匹斯山

但到了 2011 年，奥林匹斯山就从王座上掉了下来。那一年，黎明号在灶神星上发现了一座更高的山，那就是雷亚希尔维亚中央峰。

下面我们来简单介绍一下雷亚希尔维亚中央峰（图 7.11）。20 世纪 90 年代，哈勃空间望远镜就发现在灶神星的南半球，有一个非常巨大的撞击坑，叫雷亚希尔维亚。它的直径约为 505 千米，相当于整个灶神星平均直径的 95%，这让它成为太阳系最大的撞击坑之一。2011 年，黎明号在造访灶神星的时候发现，在雷亚希尔维亚撞击坑的正中央，居然矗立着一座高度超过 22 000 米的雄伟山峰。你可以想象一下。在一个表面积和巴基斯坦差不多大的小行星上，居然有一座 22 000 米高的山峰，这是一件多么震撼的事情。

可能你会好奇了："为什么太阳系的第一高峰会坐落在如此不起眼的灶神星上呢？"我们可以用前面提到过的流体静力学平衡的概念来解释一下。

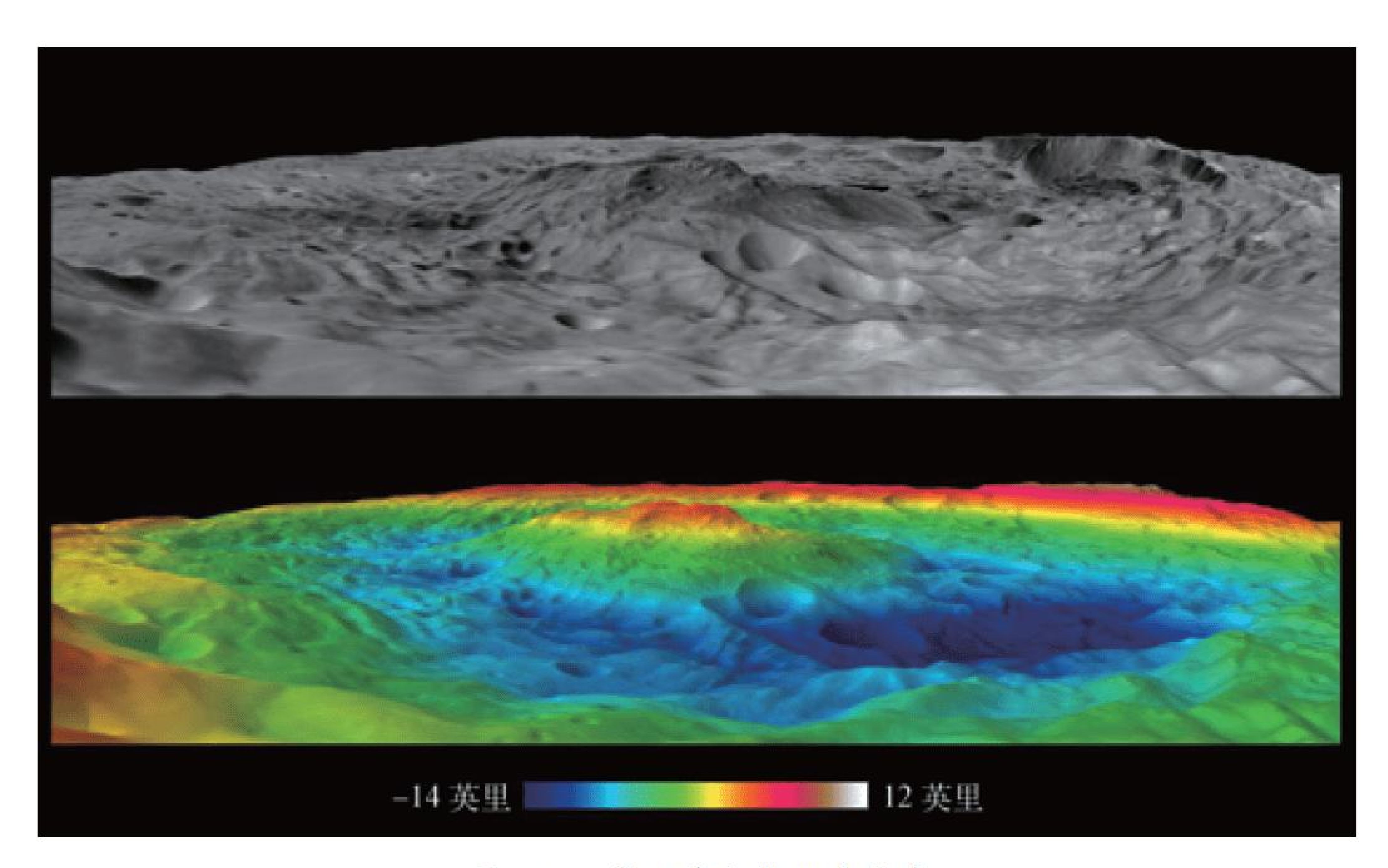


图 7.11 雷亚希尔维亚中央峰
1 英里 =1.609 千米

前面说过，岩石在极大的压力下会发生“液化”的现象，而且受到的压力越大，“液化”的程度就越明显。因此，对于质量较大的岩质天体而言，其表面的高山会比较“软”，比较容易坍塌。反过来，对于质量较小的岩质天体而言，其表面的高山会比较“硬”，比较不容易坍塌。这意味着，小质量岩质天体的山峰高度上限，将会大于大质量岩质天体。这就是火星山峰比地球山峰高很多的原因。

与此同时，要想拥有高山，岩质天体的质量也不能太小。你不妨理解成小庙供不起大菩萨。

因此，真正的高山就只能坐落在质量较小但又不能太小的岩质天体上。这样一来，灶神星质量适中的优势就体现出来了：如果它的质量再大一点，它就会像谷神星一样变成球形；如果它的质量再小一点，它就会像小行星带其他天体一样变得奇形怪状。从这个意义上讲，太阳系第一高峰坐落在毫不起眼的灶神星上，也就不足为奇了。

最后再多说几句。太阳系第一高峰其实和地球颇有渊源。现在大家普遍相信，雷亚希尔维亚撞击坑源于几亿年前发生的一次巨大撞击。这次撞击至少炸飞了灶神星 1% 的物质。大部分碎块都留在了小行星带，变成了灶神星家族小行星。剩

下的碎块则四处飞散。其中有一些碎块在经过漫长的旅程后到达了地球，然后变成了所谓的 HED 陨石（图 7.12）。

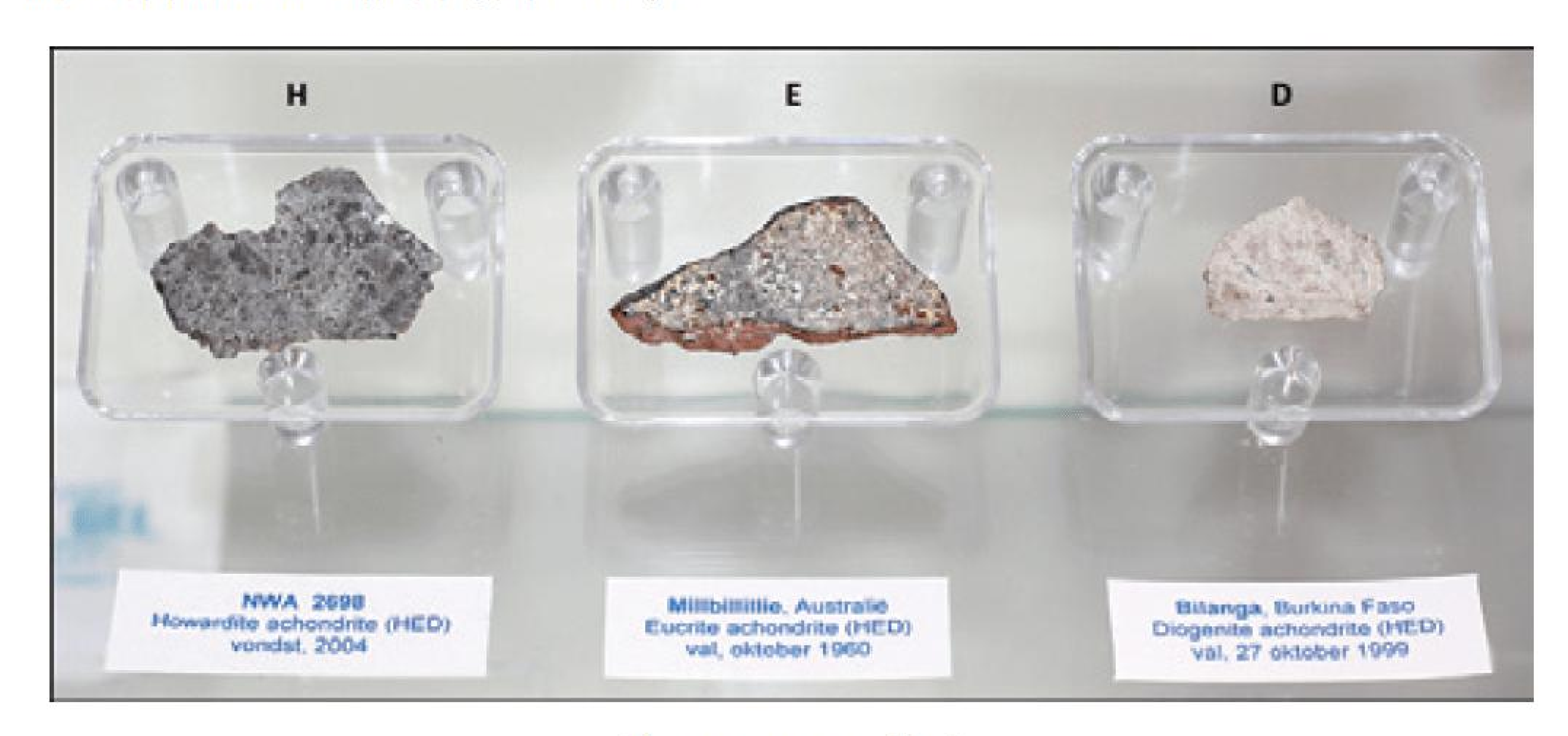


图 7.12　HED 陨石

我们来做个总结。大质量的岩质天体能对构成它的岩石施加足够大的压力，从而让这些岩石“液化”；这种情况下，要想达到流体静力学平衡，这些天体就必须变成球形。而灶神星的质量没有大到足以将自身的岩石完全“液化”，所以它就能维持椭球体的形状，而无须变成球形。2011 年，黎明号在造访灶神星的时候发现，在雷亚希尔维亚撞击坑的正中央矗立着一座高度超过 22 000 米的雄伟山峰，那就是太阳系第一高峰，即雷亚希尔维亚中央峰。太阳系第一高峰之所以会坐落在不起眼的灶神星上，是由于小质量岩质天体的山峰更难“液化”，因而能达到更大高度上限的缘故。

我们已经游览了小行星带中的谷神星和灶神星。下一节，我们将跳出小行星带，去拜访一位来自太阳系外的神秘访客。



7.3 为什么说奥陌陌是来自太阳系外的星际来客？

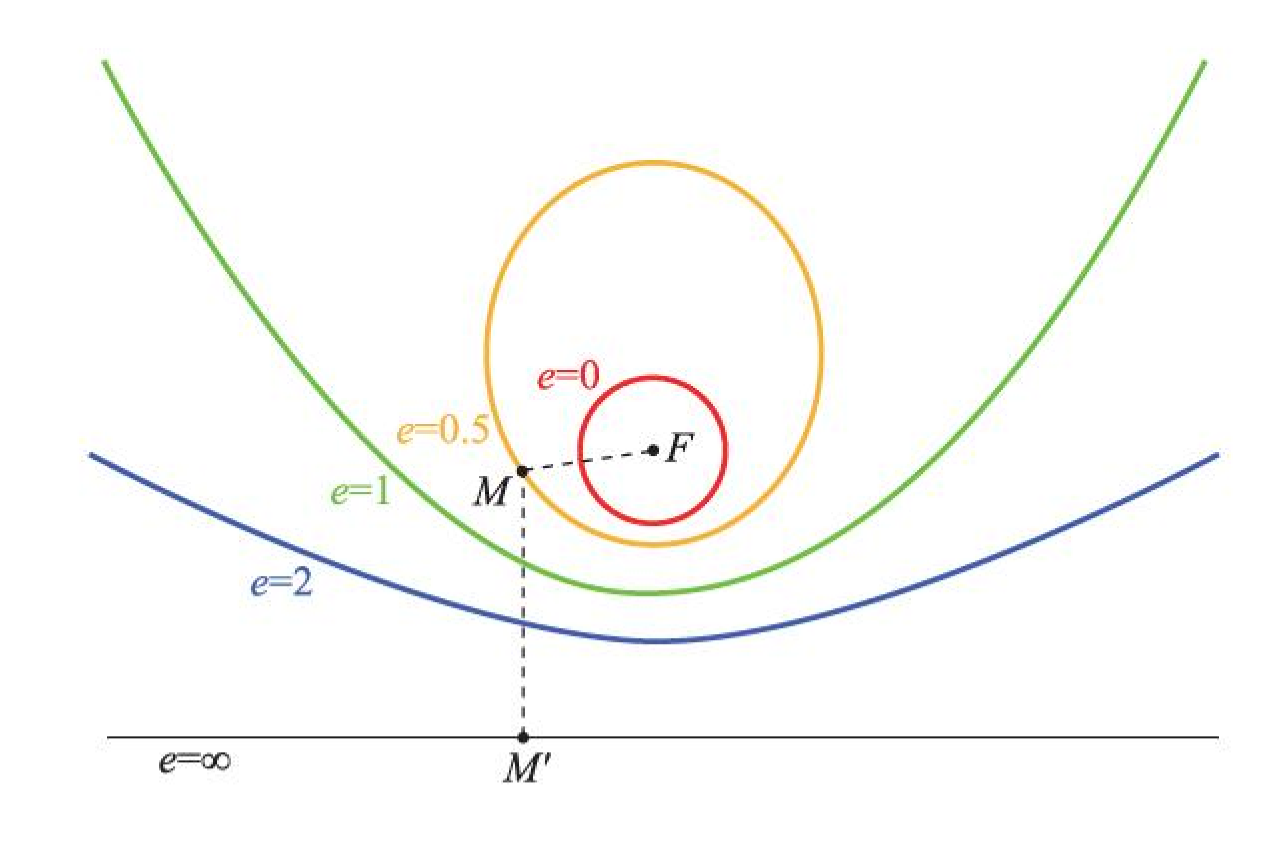
2017 年 10 月 19 日，夏威夷大学天文系的罗伯特 · 韦尔克利用位于夏威夷毛伊岛上的泛星计划望远镜（图 7.13），发现了一个与众不同的小天体。经过更深入的研究，他发现这个小天体其实是一个来自太阳系外的星际来客。这也是人类历史上第一次看到来自太阳系外的天体。



图 7.13　泛星计划望远镜

可能你会问了：“凭什么断定它来自太阳系外呢？”要回答这个问题，就必须先介绍一个数学概念：偏心率。

在数学上，偏心率是一个用来描述圆锥曲线性质的参数。圆锥曲线总共有三种类型，分别是椭圆（圆是一种特殊的椭圆）、抛物线和双曲线。图 7.14 就展现了这三种圆锥曲线最核心的特征。



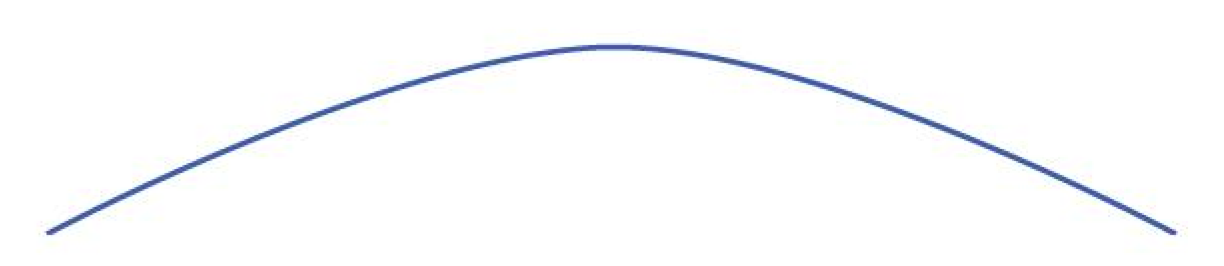


图 7.14　三种圆锥曲线的特征

任意一种圆锥曲线都有一个很特殊的点，称为焦点（也就是图中的 *F* 点）。与此同时，它还有一条很特殊的直线，称为准线（也就是图中的那条黑色直线）。所有的圆锥曲线都可以用下面的方法来定义：曲线上任意一点（即 *M* 点）到焦点的距离（即线段 *MF*），与它到准线的距离（即 *M* 点到准线的垂线段）之间的比值，都是一个常数 *e*。这个常数 *e*，就是圆锥曲线的偏心率。

偏心率的大小决定了圆锥曲线的形状。对圆而言，e=0；对椭圆而言，0<e<1；对抛物线而言，e=1；对双曲线而言，e>1。事实上，你可以把偏心率看成是圆锥曲线偏离圆的程度的量度。某种圆锥曲线的偏心率与 0 相差越多，就说明这种圆锥曲线与圆的差别越大。

知道了偏心率的概念，下面我们就可以来聊聊为什么那个小天体一定来自太阳系外了。

除太阳以外，太阳系的所有天体都有自己的运动轨道。事实上，它们的运动轨道全都是圆锥曲线。

实际观测表明，几乎所有太阳系天体运动轨道的偏心率都在 0 ~ 1 之间。这意味着，它们都在以椭圆轨道绕太阳旋转。

也有很少量的天体，其运动轨道偏心率等于 1。因此，它们在以抛物线轨道运动。以抛物线轨道运动的意思是，这些天体在太阳引力范围之外的速度为 0。

这意味着，这些天体都来自太阳系的边缘。

唯一的一个例外，就是前面说过的那个在 2017 年 10 月 19 日发现的小天体。它的运动轨道偏心率是 1.2。因此，它在以双曲线轨道运动。以双曲线轨道运动的意思是，这个天体在太阳引力范围之外仍然有大于 0 的速度。因此，它肯定是一个来自太阳系外的星际来客。

一开始的时候，韦尔克还犯了一个错误：他把这个小天体当成了一颗彗星，也就是那种靠近太阳时会出现长尾巴（即彗尾）的脏雪球。但后来，人们发现这个小天体靠近太阳时根本没出现彗尾，所以就把它的类别改成了小行星。①

按照惯例，小行星的发现者有权对小行星命名。夏威夷大学的天文团队就把这个来自太阳系外的小行星命名为 Oumuamua，中译名是奥陌陌。这个名字来源于夏威夷当地的土著语言，意思是“第一位来自远方的使者”。

图 7.15 就是科学家们计算出来的奥陌陌在太阳系中的运动轨迹。它来自天琴座的方向，以 123 度的巨大倾角进入太阳系，于 2017 年 9 月 9 日经过近日点，然后在太阳引力的作用下大幅转弯，并朝飞马座的方向飞去。这就是我们前面讲过的双曲线轨道。很明显，有这种运动轨道的天体，不可能是太阳系的成员。

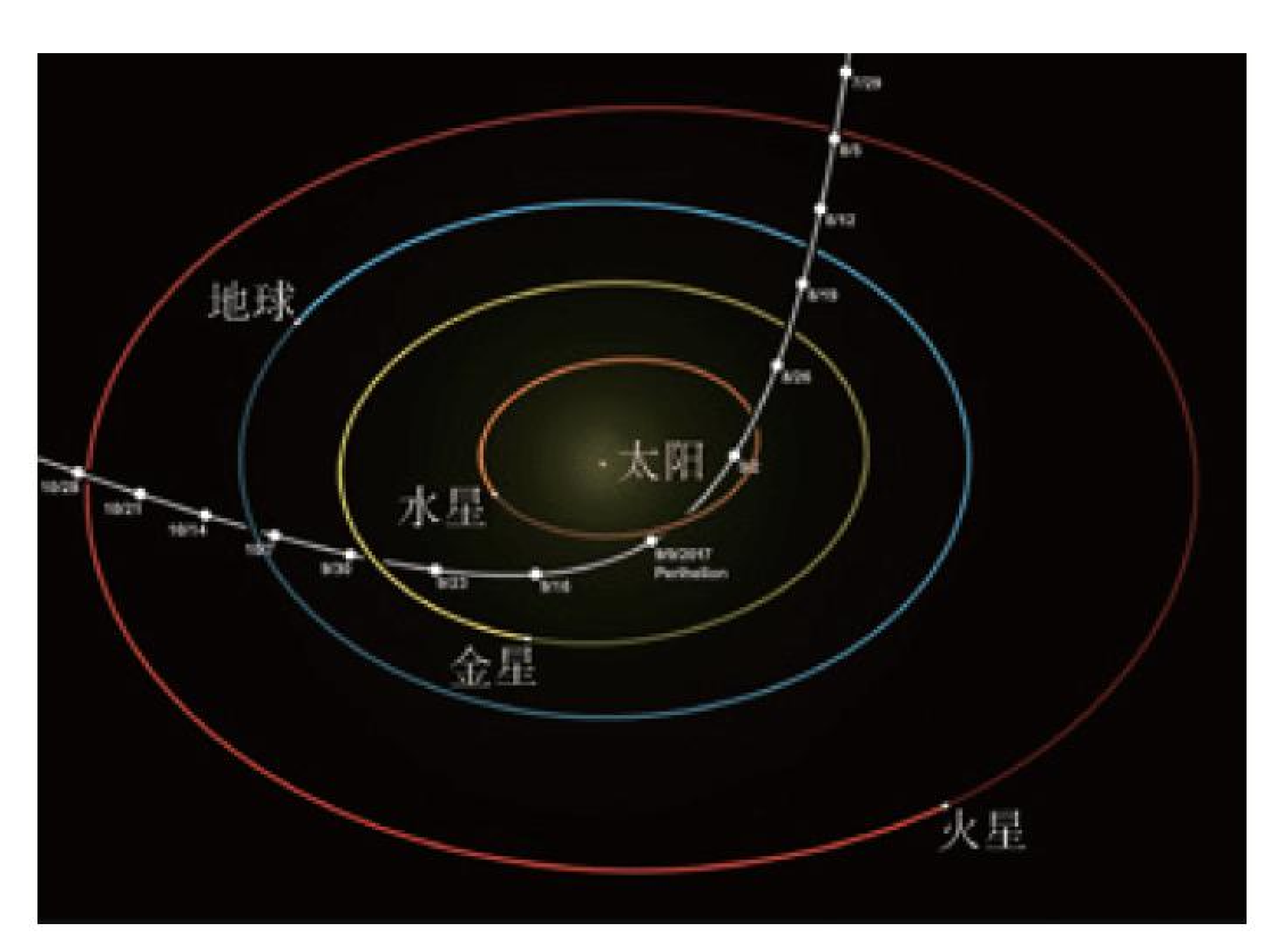


图 7.15　奥陌陌的运动轨迹

除了轨道绝无仅有，奥陌陌的画风也是独树一帜。进一步的观测表明，奥陌陌是一个雪茄状的天体。它的长度约为 400 米，而宽度却只有区区 40 米。换句

① 后来又有人认为，这个小天体是一种特殊的慧星，所以此问题目前尚无定论。

话说，它的长宽比能达到 10:1，是目前人类观测到的长宽比最大的天体（其他天体的长宽比，最大也只能达到 4:1）。图 7.16 就是艺术家所构想的奥陌陌的样子。



图 7.16　奥陌陌的假想图

由于奥陌陌质量小，它就无须受到我们上一节讲过的流体静力学平衡的限制，因而可以长成相当不规则的形状。但即使如此，10:1 的长宽比依然让科学家们大吃一惊。这是因为如此长而扁的天体，很容易在自转的过程中分崩离析。要想防止这种情况的发生，这个天体就必须具有非常高的密度。科学家们据此推断出，奥陌陌主要由铁核和岩石构成的，几乎不含密度较小的水和冰。

我们来做个总结。2017 年 10 月 19 日，夏威夷大学的罗伯特·韦尔克利用泛星计划望远镜，发现了一个后来被称为奥陌陌的小行星。后续的观测表明，奥陌陌的运动轨道偏心率是 1.2，所以它的运动轨道就一定是双曲线。这意味着，奥陌陌在太阳引力范围之外仍然有大于 0 的速度，因此它肯定来自太阳系外。这也是人类历史上第一次看到来自太阳系外的星际来客。进一步的观测表明，奥陌陌是一个雪茄状的天体，其长宽比能达到惊人的 10:1。这也让它成为整个太阳系中外形最独特的天体之一。

08

木　星

8.1 为什么说大红斑是太阳系中最大的风暴？

离开了小行星的世界，让我们前往这次太阳系之旅的第八站：木星（图 8.1）。

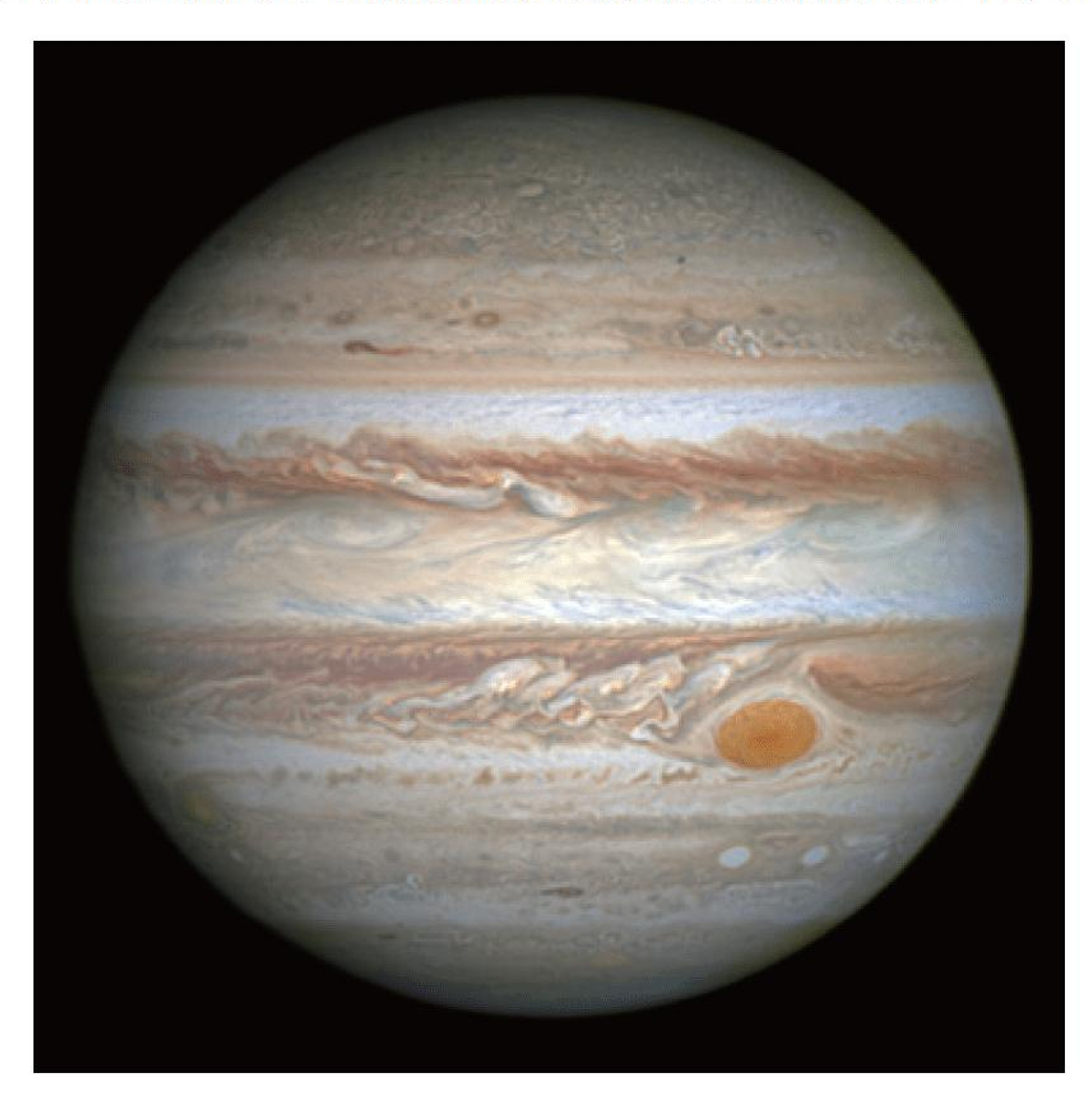


图 8.1　木星

质量：1.898×10^{27} 千克（地球质量的 317.8 倍）
体积：1.431×10^{24} 立方米（地球体积的 1321 倍）
与太阳的平均距离：7.786×10^{8} 千米（日地距离的 5.2 倍）

木星是太阳系行星中的巨无霸，其直径是地球直径的 11 倍。换句话说，如果把木星当成一个容器，里面能装下 1300 多个地球。此外，木星的质量是太

阳系其他行星质量总和的 2.5 倍，其中包含着 75% 的氢、24% 的氦和 1% 的其他元素。

木星是天空中第四明亮的天体，仅仅逊于太阳、月球和金星。与前面游览过的那些行星不同，木星是一个气态行星，没有固体的表面。它大概花 12 年能绕太阳转上一周。因此中国古代把木星称为“岁星”，并以此为基础创造了十二生肖的概念。

而木星上有一个最壮丽的景观，那就是整个太阳系中最大的风暴：大红斑（图 8.2）。

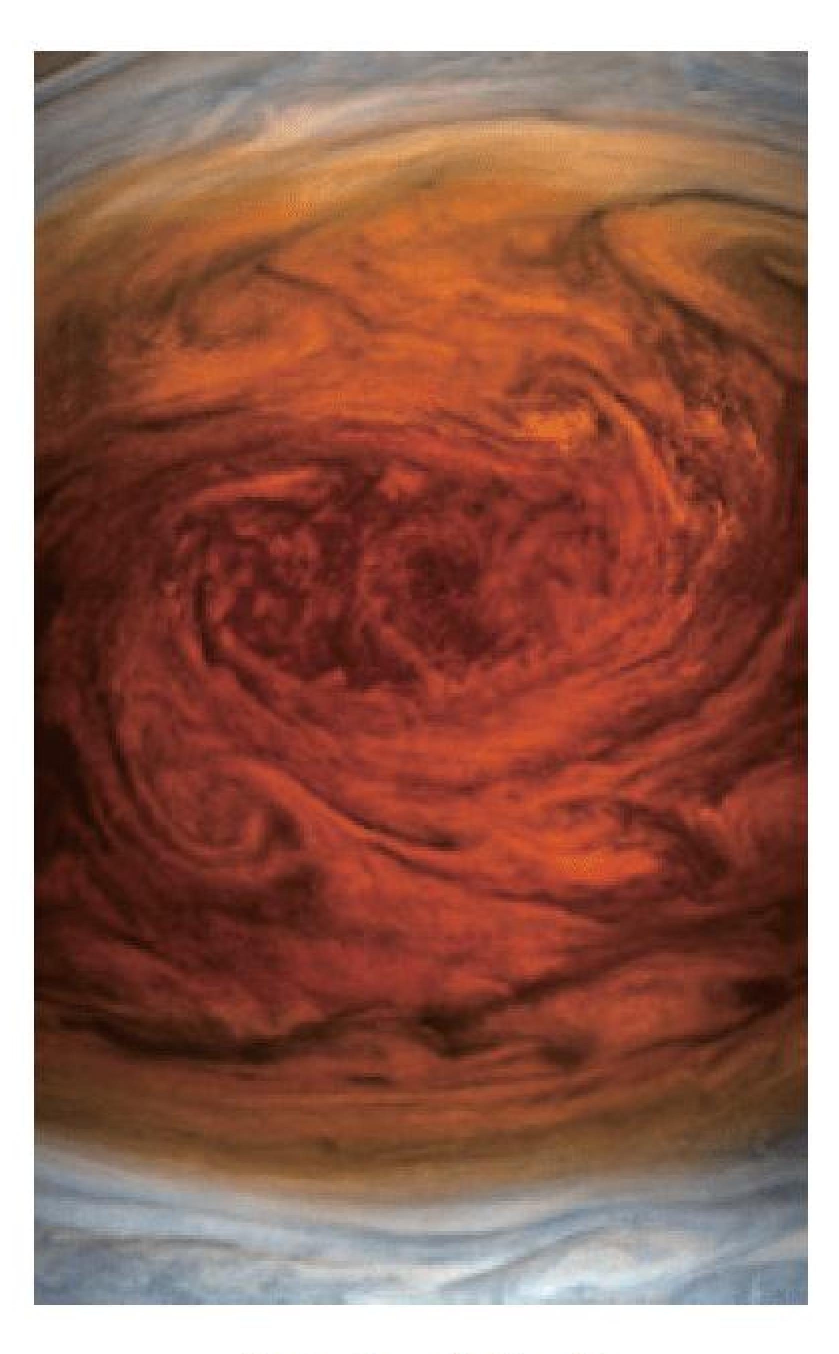


图 8.2 大红斑

最早发现大红斑的人，是我们在游览地球时一笔带过的英国著名物理学家罗伯特·胡克（图 8.3）。

1635 年，胡克出生在英格兰的怀特岛。很像牛顿，他也有一个充满苦难的童年。由于身材矮小，以及先天性驼背，胡克在小学没少受坏孩子的霸凌。13 岁那年，他爸爸去世了。为了维持生计，胡克只好背井离乡，跑到伦敦去当学徒。幸好，他天资聪颖，成功考入了威斯敏斯特中学。这也成为他命运的转折点。



图 8.3 罗伯特·胡克

18 岁那年，胡克考入了牛津大学基督教堂学院。20 岁的时候，他成为英国化学家罗伯特·波义耳的助手。25 岁那年，他就发现了“胡克定律”。28 岁那年，他又发明了一种高分辨率的显微镜，从而第一个看到了植物细胞的细胞壁，进而率先提出了“细胞”的概念。由于这些贡献，胡克在不到 30 岁的时候就被选为英国皇家学会的院士，并被人们誉为“伦敦的达·芬奇”。

成名后的胡克也逐渐变得傲慢起来，开始时不时地打压新人。1672 年，他盯上了一个声名鹊起的新人。此人比胡克小 7 岁，因为发明了一种新型望远镜，而在不到 30 岁的时候当选为英国皇家学会的院士。应皇家学会的邀请，新院士

到了伦敦，做了一场关于光学的演讲。演讲结束后，胡克竟然跳出来砸场子，把新院士的理论批驳得一文不值。

事后证明，这是胡克一生中所犯过的最大的错误。因为他得罪的这个新院士，就是大名鼎鼎的牛顿。两个从小受尽苦难折磨的天才，就这样开始了一场延绵数十年的命中注定的战争。

冲突过后，牛顿回到了剑桥大学，开始过与世隔绝的生活。但是两人的孽缘并没有结束。1679 年，胡克给牛顿写了封信，说他刚当上皇家学会的秘书长，想要和牛顿探讨一下学术问题。随后，两人你来我往地写了很多信。在此期间，胡克告诉牛顿，他认为任意两个物体之间都存在引力，且这种引力与物体间的距离平方成反比。这就是我们以前讲过的平方反比律。但问题是，胡克仅仅提出了这么一个猜想，却完全无法证明它的正确。因为要想证明它，就必须用到由牛顿发明、其他人都不会的微积分。

前面讲过，牛顿于 1687 年出版了人类科学史上最伟大的著作《自然哲学的数学原理》(简称《原理》)。在这本书中，牛顿用他发明的微积分，证明了从引力的平方反比律出发可以推导出开普勒三定律。这本书的出版，让牛顿直接登上了科学的神坛。

就在这时，胡克出了一个大昏招：他给牛顿写信，要求牛顿修订《原理》，承认自己才是平方反比律的发现者。这个要求彻底激怒了如日中天的牛顿。他给胡克回信，说这个定律早就有人提出了(例如前面介绍过的布利奥和博雷利)，跟胡克没有任何关系。为了嘲讽胡克，牛顿还在信中写了一句特别恶毒的话："如果我能看得更远一点的话，是因为我站在巨人的肩膀上。"其中的潜台词是，"我的所有成就，都与你这个驼背的矮子无关！"

搞笑的是，这句明明是用来骂人的话，后来竟然变成了用来展现牛顿谦虚品质的名言。

《原理》出版以后，两人之间的战争就逐渐失去了悬念。随着牛顿的步步高升，胡克在皇家学会的地位也渐渐被边缘化。1703 年，胡克逝世。随后，牛顿当上了英国皇家学会的会长。他对当年打压过自己的胡克进行了残酷的报复，关闭了胡克的实验室，烧毁了胡克的画像，还抹掉了胡克在皇家学会的一切痕迹。

但时间最终还是为胡克平了反。现在人们普遍承认，胡克也是 17 世纪的科学巨匠之一。

言归正传。1664 年，胡克看到木星上有一个非常巨大的斑点。时至今日，这个斑点依然没有消失。换句话说，它已经至少存在了 350 多年。这个斑点，就是著名的大红斑（图 8.4）。



图 8.4　大红斑近景图

事实上，大红斑的颜色并非固定不变。它有时会变成深红色，有时会变成浅红色，有时还会变成白色。那人们为什么要称这个会变色的斑点为大红斑呢？其实是由于一个画展。

1711 年，意大利画家多纳托・克雷蒂在梵蒂冈办了一个画展，其主题是太阳系的各个天体。在画木星的时候，克雷蒂把这个大斑点涂成了红色。这幅画在画展上受到了一致的好评。从那以后，人们就把这个斑点称为大红斑。

大红斑到底是什么呢？你可以把它理解成一个在木星上肆虐的超级风暴。当然，它的规模已经远远超越地球人对风暴的认知。地球上最大的风暴，最多能装下 1 个日本；而大红斑块头最大的时候，能装下整整 3 个地球。此外，大红斑的最高风速能达到 180 米・秒 $^{-1}$。你不妨想象一下。一个块头比地球还大的风暴，

以 180 米·秒 $^{-1}$ 的风速，肆虐了至少 350 多年，这是一件多么恐怖的事情！

大红斑还有一个特殊之处。众所周知，地球上的风暴可以在地球表面自由移动。但大红斑不同。它被锁死在南纬 23 度的附近，只能沿东西方向而不能沿南北方向移动。这是因为大红斑被夹在了两股沿东西方向运动的强大气流之间。为了便于理解，你可以把大红斑想象成一个夹在两条传送带之间的皮球，只能沿传送带的方向滚动。

直到今天，大红斑对人类而言依然是迷雾重重。比如说，现在还没人知道它到底是如何诞生，没人知道它究竟有多古老，也没人知道它为何能持续如此之长的时间。

不过最近几十年的天文观测揭示了一件非常有趣的事情：大红斑正在越变越小。块头最大的时候，它的长度能达到地球直径的 3 倍；而现在，它的长度只有地球直径的 1.3 倍。与此同时，木星上正在崛起一股新生的力量，这就是所谓的小红斑（图 8.5）。



图 8.5　小红斑

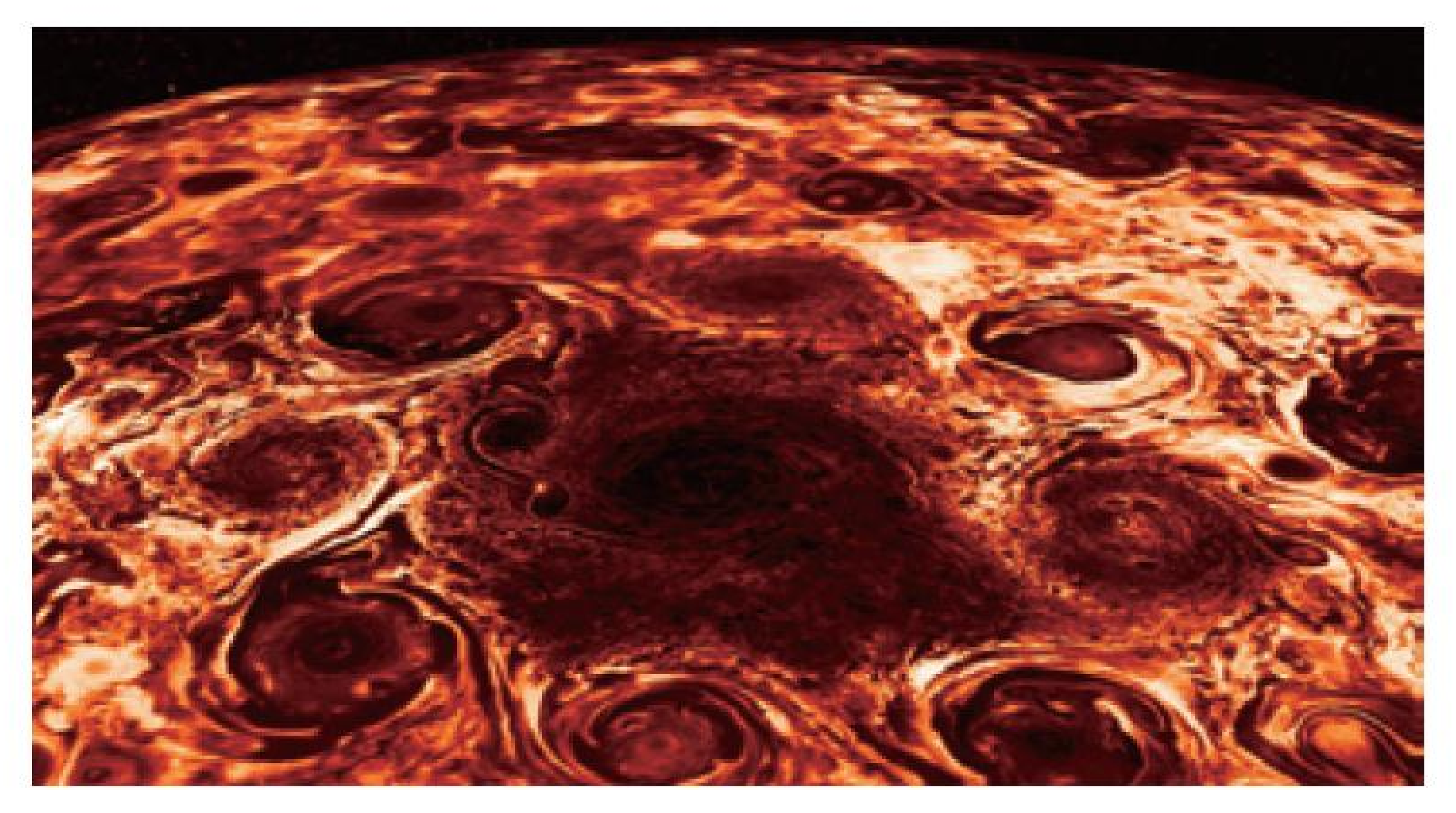
在 2000 年 3 月，3 个椭圆形小风暴合并在一起，从而形成了一个新的巨型风暴，也就是小红斑。此后的十多年间，小红斑变得越来越大，目前其长度已经达到了地球直径。照这个势头发展下去，或许在不远的将来，已经肆虐了至少 350 多年的大红斑，就将拱手让出太阳系最大风暴的宝座。

说几句题外话。2011 年 8 月 5 日，NASA 发射了朱诺号卫星探测器（图 8.6）。在飞行了 4 年 11 个月以后，它于 2016 年 7 月 5 日顺利进入了绕木星飞行的轨道，开始对木星进行科学研究。



图 8.6　朱诺号卫星探测器

2018 年 3 月 8 日，朱诺号项目组在著名学术期刊《自然》上发表了一篇论文，描绘了一个在整个太阳系都堪称绝无仅有的奇观：在木星北极，一个极地气旋周围还环绕着 8 个气旋；而在木星南极，一个极地气旋周围还环绕着 5 个气旋（图 8.7）。



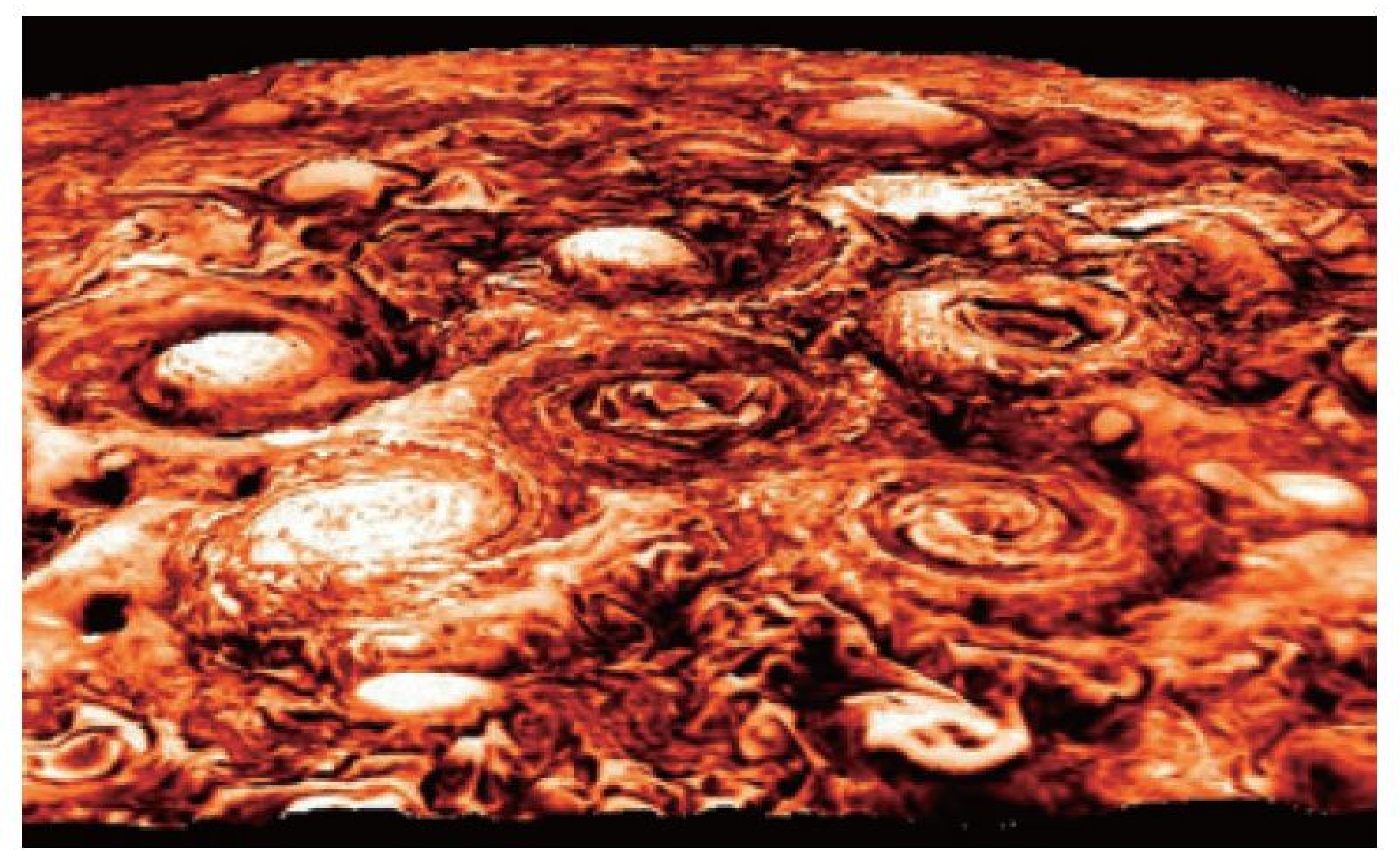


图 8.7　木星两极的巨大气旋

为什么木星的两极地区会出现如此奇怪的景观？目前人们还找不到任何头绪。这说明，木星的大气系统远比人们原来的预想要复杂。

我们来做个总结。1664 年，胡克看到木星上有一个非常巨大的斑点。在 1711 年的一个画展上，意大利画家克雷蒂把它画成了红色；从那以后，人们就把它称为大红斑。大红斑是一个超级风暴，以 180 米·秒 $^{-1}$ 的风速在木星上肆虐了至少 350 多年。此外，它就像一个夹在两条传送带之间的皮球，一直被固定在了木星南纬 23 度的附近，只能沿东西方向而不能沿南北方向移动。最近几十年的天文观测显示，大红斑正在越变越小。它的长度已经由块头最大时地球直径的 3 倍，下降到了现在地球直径的 1.3 倍。照这个势头发展下去，或许在不远的将来，大红斑就将拱手让出太阳系最大风暴的宝座。

我已经介绍了太阳系中最大的风暴：木星大红斑。下一节，我要讲一个更为狂暴的天文事件。它也是人类目前观测到的太阳系规模最大的行星撞击事件。

8.2 为什么说木星是地球的守护神?

1994 年 7 月 16 日，全世界的新闻媒体都不约而同地直播了一次前所未见的天文事件，那就是著名的“彗木相撞”事件。

早在 1993 年 3 月，就有 3 个人预言了这一事件的发生。他们是一个相当奇怪的组合: 一位差点登上月球的地质学家，一位曾经痛恨理科的家庭主妇，以及一位靠天文吃饭的英国文学硕士。下面，我就来讲讲他们的故事。

我们先从那个地质学家讲起，他叫尤金·舒梅克(图 8.8)。尤金·舒梅克从小就对各种各样的矿石有浓厚的兴趣，甚至还给一个宝石工匠当过学徒。1944 年，16 岁的尤金·舒梅克考上了加州理工学院，学习地质学。19 岁，他大学毕业; 20 岁，他获得硕士学位。



图 8.8 尤金·舒梅克

毕业后，尤金·舒梅克加入了美国地质调查局。地质调查局分配给他的第一个任务，是去科罗拉多州和犹他州搜寻铀矿。几年后，地质调查局又派他去研究火山过程，因为铀矿经常出现在火山口的周围。这项任务让他跑到了亚利桑那州北部。在那里，尤金·舒梅克遇到了一个大坑。

这是一个直径约为 1.2 千米、深度能达到 170 米的大坑。1903 年，美国采矿工程师巴林杰买下了它的所有权。巴林杰认为，这个坑是被一个含有大量铁和镍的巨大陨石撞出来的; 他打算把这些铁和镍都挖出来，从而发一笔大财。但他挖了 20 多年，什么都没有挖到。他的陨石撞击理论也沦为人们的笑柄。在长达半个世纪的时间里，人们普遍认为这个大坑是一次大规模火山爆发的结果。

但尤金·舒梅克不这么看。他认为这里的火山活动，根本不可能制造出这么巨大的坑。为了破解其中的奥秘，他跑到了内华达州，去研究那里的一个地下核

爆破坑。尤金·舒梅克研究发现，巴林杰买下的这个大坑与核爆产生的极为相似。换句话说，它的成因是外部的剧烈冲击，而非内部的火山喷发。据此，尤金·舒梅克推断，这个大坑（现在人们叫它巴林杰陨石坑）的的确确是源于一颗巨大陨石的撞击（图 8.9）。



图 8.9　巴林杰陨石坑

这个发现，让尤金·舒梅克于 1960 年获得了普林斯顿大学的博士学位。事实上，这个发现也开创了一门全新的学科：天文地质学。

需要说明的是，尤金·舒梅克的陨石撞击理论并没有得到学术界的普遍认可。很多人都认为，陨石撞击不会产生这么巨大的破坏力。要想说服众人，舒梅克需要找到陨石撞击产生巨大破坏的直接证据。为此，他把目光从地球转向了太空。

尤金·舒梅克首先想到的是月球。他认为，遍布在月球上的密密麻麻的环形山（图 8.10），有可能也是因陨石撞击而形成的。

美国那时正在开展阿波罗登月计划。尤金·舒梅克的研究吸引了 NASA 的浓厚兴趣。事实上，NASA 甚至把他列入了阿波罗登月计划的候选宇航员的名单。后来由于身体的原因，舒梅克才与月球失之交臂。不过，他还是帮助 NASA 培训了好几批阿波罗计划的宇航员。

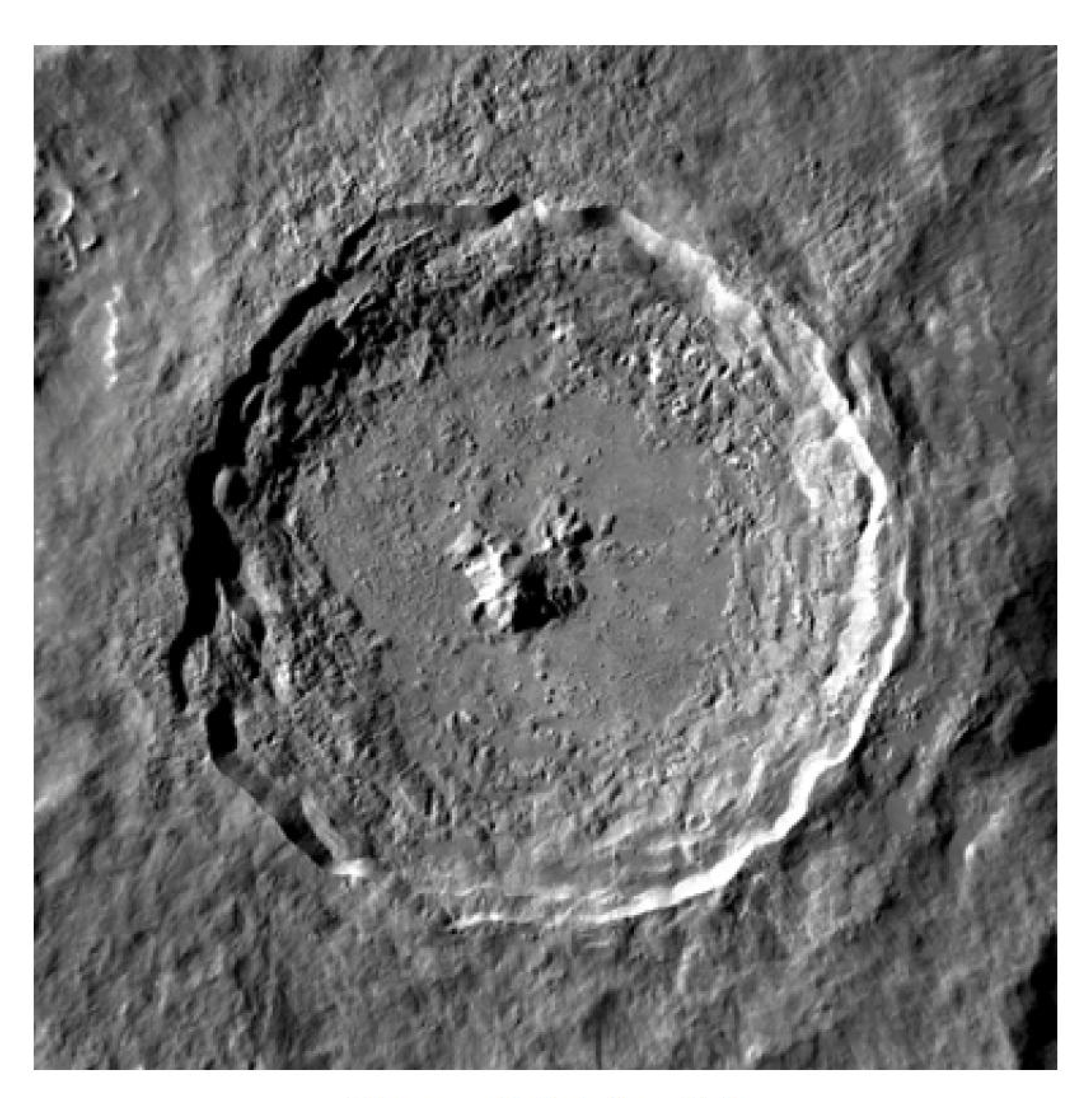


图 8.10　月球上的环形山

1969 年，尤金·舒梅克回到他的母校加州理工学院任教。此时，他的兴趣已经转向了那些“陨石坑的肇事者们”，即彗星和小行星。利用帕洛马山天文台的一个 0.5 米的施密特望远镜，尤金·舒梅克开始系统地搜寻那些可能会掠过地球的彗星和小行星。最开始的时候，他一直都单枪匹马。但十年之后，他有了一个非常得力的助手，那就是他的妻子卡罗琳·舒梅克（图 8.11）。



图 8.11　卡罗琳·舒梅克

尤金·舒梅克在加州理工学院读书的时候，有一个叫理查德·斯佩尔曼的室友。1950 年，理查德·斯佩尔曼结婚，邀请尤金·舒梅克做他的伴郎。在那场婚礼上，尤

金・舒梅克遇到了新郎的妹妹卡罗琳・斯佩尔曼。

卡罗琳・斯佩尔曼是一名英国文学硕士。作为一个典型的文科生，她从小就特别讨厌理科，经常在上这类课程的时候睡觉。但认识了尤金・舒梅克以后，一切都变了。或许是由于爱情的力量，一个经常在理科课堂上打瞌睡的女生，竟然对枯燥的地质学产生了浓厚的兴趣。

相识一年半后两人结婚，卡罗琳・斯佩尔曼也改名为卡罗琳・舒梅克。婚后不久，她就当了一名家庭主妇。51 岁的时候，她的 3 个孩子都离家上大学去了。由于无法忍受空巢老人的孤独感，她决定找一份工作。所以她就去了帕洛马山天文台，成了自己丈夫的助手。



图 8.12 大卫・利维

卡罗琳・舒梅克有一个好友，叫大卫・利维（图 8.12）；他是一个拥有英国文学硕士学位的作家，并且从小就对天文学感兴趣。所以卡罗琳・舒梅克就向他发出邀请，利用闲暇时间来天文台搜寻彗星和小行星。

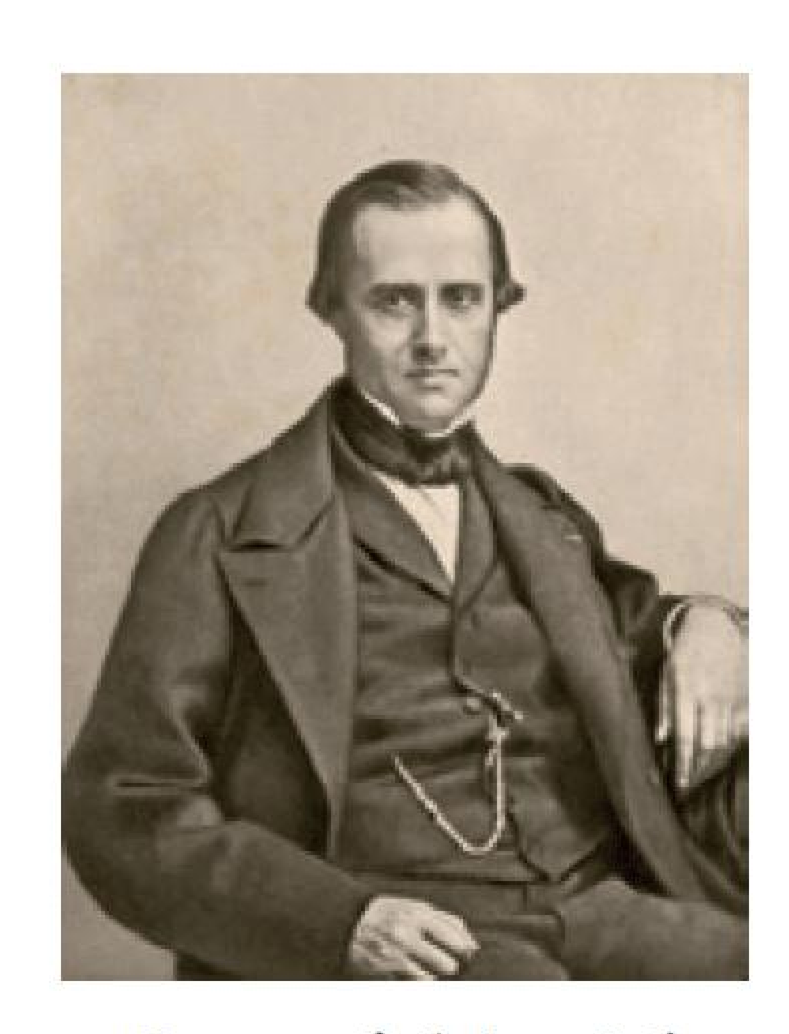
诡异的是，这两个半路出家的文科生，却成了那个年代最好的小行星猎手。卡罗琳・舒梅克一生中发现了 30 多颗彗星和 800 多颗小行星，而大卫・利维也发现了 20 多颗彗星和上百颗小行星。

1993 年 3 月 24 日，这个三人团队终于迎来了他们一生中最光辉的时刻。

那天晚上，舒梅克夫妇和大卫・利维又像往常一样，开始用那个 0.5 米施密特望远镜来搜寻彗星和小行星。这一次，他们在木星周围发现了 21 块奇怪的碎片。研究表明，这些碎片都源于同一颗彗星。在此之前，这三人已经合作发现了 8 颗彗星。所以这颗新彗星就被命名为舒梅克 - 利维九号彗星。

为什么舒梅克 - 利维九号彗星会支离破碎呢？答案是，它不慎落入了木星的洛希半径。

以前游览月球的时候，我们就已经讲过潮汐力，也就是一个天体作用在另一个天体近端和远端处的引力差异。前面说过，正是地球的潮汐力，让月球发生了潮汐锁定。


图 8.13 爱德华·洛希

1848 年，法国天文学家爱德华·洛希（图 8.13）发现，每个大质量的天体都存在一个特定的半径。如果一个小天体不慎进入这个特定的半径，大质量天体的潮汐力就会超过小天体自身的引力，从而将这个小天体撕毁。这个特定的半径就是所谓的洛希半径。

事实上，洛希半径的大小取决于两个因素：大天体的质量和小天体的体积。大天体的质量越大，或小天体的体积越大，洛希半径都会越大。

举个例子。月球目前与地球大概相距 38 万千米。如果这个距离减小到 9500 千米，月球就会被地球的潮汐力撕碎。此后，这些月球的碎片还会继续绕地球旋转，直至最终撞上地球。

这正是舒梅克－利维九号彗星（图 8.14）的命运。由于进入了木星的洛希半径，它被木星的潮汐力撕成了 21 个碎片。这 21 个碎片的块头介于几百米到两千米之间。它们一字排开，就像一列拥有 21 个车厢的星际列车，继续绕木星旋转。而研究表明，用不了多久，这列星际列车就会与木星撞在一起。


图 8.14 舒梅克－利维九号彗星

尤金·舒梅克非常兴奋。多年来他一直主张地球和月球上的大坑都是被陨石撞出来的，但由于找不到陨石撞击天体的直接证据，他的理论一直得不到主流地质学界的认可。而现在终于有了亲眼看见行星撞击事件的机会。但舒梅克的对头们还是纷纷表示不屑。有人甚至宣称，这 21 块碎片，“木星不用打嗝就能全部吞

下去”。

1994 年 7 月 16 日，舒梅克－利维九号星际列车终于到达了它的终点站木星。随后发生的事，让所有的天文学家都目瞪口呆。在 6 天的时间里，21 个碎片先后撞上木星，然后在木星表面留下了一连串巨大的伤疤（图 8.15）。其中威力最大的是第七个碎片，即碎片 G。它在 7 月 18 日的 07:33 撞上了木星，从而在木星表面撞出了一个直径超过 12 000 千米的伤疤。换句话说，这个伤疤可以装下整个地球。据估算，这次撞击释放出的能量相当于 60 000 亿吨 TNT 炸药，相当于全球核武器储备总和的 600 倍。你可以想象一下，这要是撞上地球，后果会有多可怕。

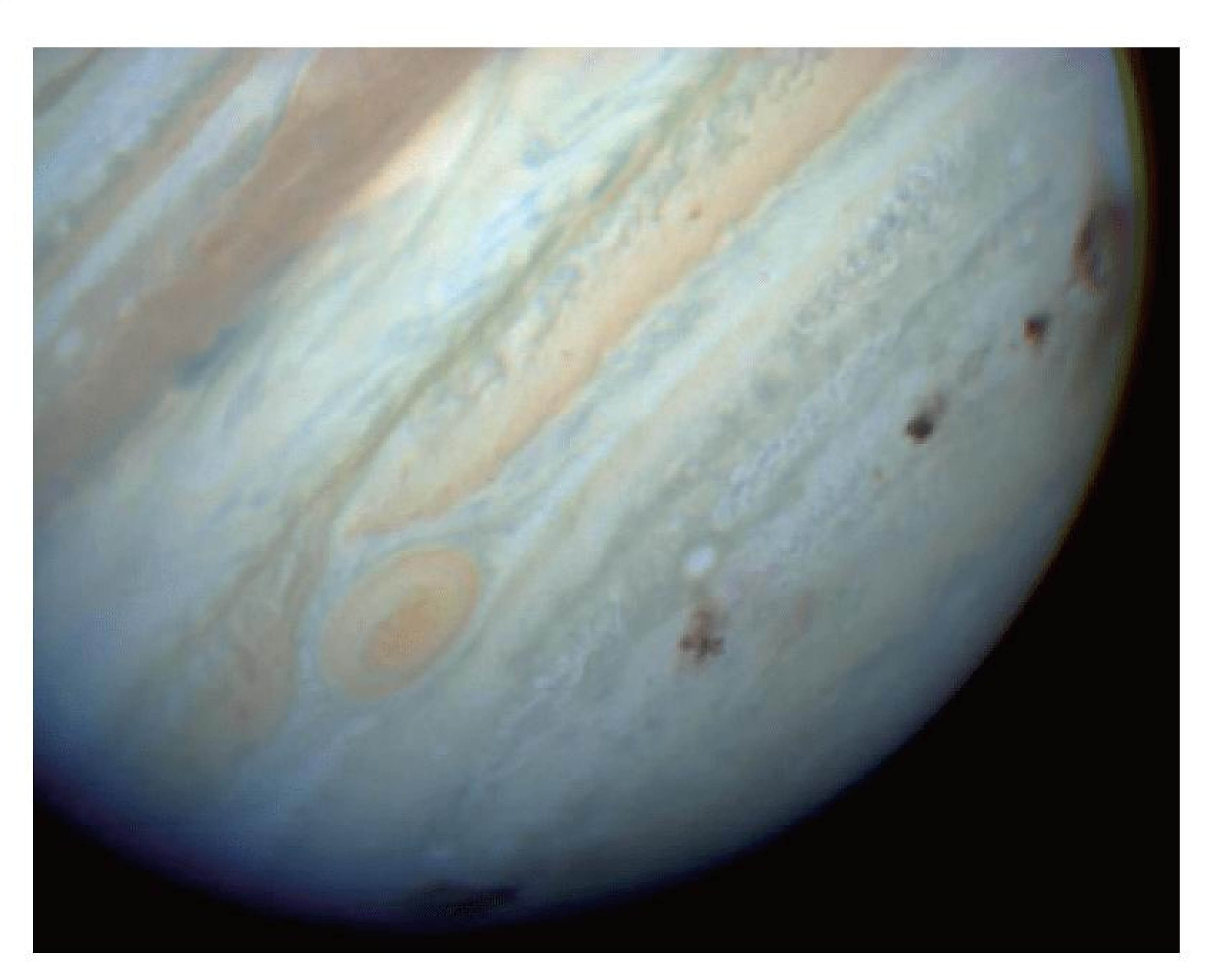


图 8.15　木星上的陨石坑

在被地质学界冷落了多年以后，尤金・舒梅克终于获得了辉煌的胜利。从那以后，再也没有人怀疑他的陨石撞击理论了。

现在人们普遍相信，木星扮演了太空吸尘机的角色，挡住了大量可能威胁地球的彗星和小行星。换句话说，它是真正意义上的地球守护神。

最后多说几句。1997 年，尤金・舒梅克在澳大利亚遭遇了一场车祸，不治身亡。为了纪念他，NASA 于 1998 年 1 月 7 日发射了探勘者号月球探测器，把

他的部分骨灰带到了月球南极的一个陨石坑里。他的骨灰就这样与月球的土地融为一体，从而让他成为世上唯一一个被安葬在月球上的人类。

卡罗琳 · 舒梅克对此感到非常开心。她曾说过：“每当我抬头看月亮时就会想到，尤金就在那里。”

我们来做个总结。20 世纪 50 年代，尤金 · 舒梅克提出亚利桑那州北部的一个大坑其实是源于一颗巨大陨石的撞击。为了找到支持自己理论的证据，他从 1969 年开始系统地搜寻那些可能会掠过地球的彗星和小行星。他的妻子卡罗琳 · 舒梅克，以及妻子的好友大卫 · 利维，先后加入了他的团队。1993 年 3 月 24 日，这个三人团队发现了被木星潮汐力撕成 21 块碎片的舒梅克 – 利维九号彗星。从 1994 年 7 月 16 日开始，舒梅克 – 利维九号的 21 个碎片先后撞上木星，并在木星表面留下了一连串巨大的伤疤；而威力最大的碎片 G 撞出的伤疤，甚至能装下整个地球。这让尤金 · 舒梅克的陨石撞击理论得到了广泛的认可。现在人们普遍相信，木星扮演了太空吸尘机的角色；换句话说，它是真正意义上的地球守护神。

我已经介绍了著名的木星大红斑和慧木撞击事件。下一节，让我们离开木星，一起去探访木星的卫星世界。

8.3 为什么木卫一长得特别像鸡蛋葱花饼？

就目前所知，木星总共有 79 颗卫星，这让木星成为太阳系中拥有最多卫星的天体。块头最大的 4 颗卫星分别是木卫一、木卫二、木卫三和木卫四（图 8.16），也叫艾奥、欧罗巴、加尼美得和卡里斯托。



图 8.16　木卫一、木卫二、木卫三和木卫四

在这些卫星中，质量最大的是加尼美得，占所有木星卫星总质量的 37.696%。第二大的是卡里斯托，占总质量的 27.37%。第三大的是艾奥，占总质量的 22.721%。第四大的是欧罗巴，占总质量的 12.21%。而剩下的那 65 颗卫星，全部加起来也只占总质量的 0.003%（图 8.17）。

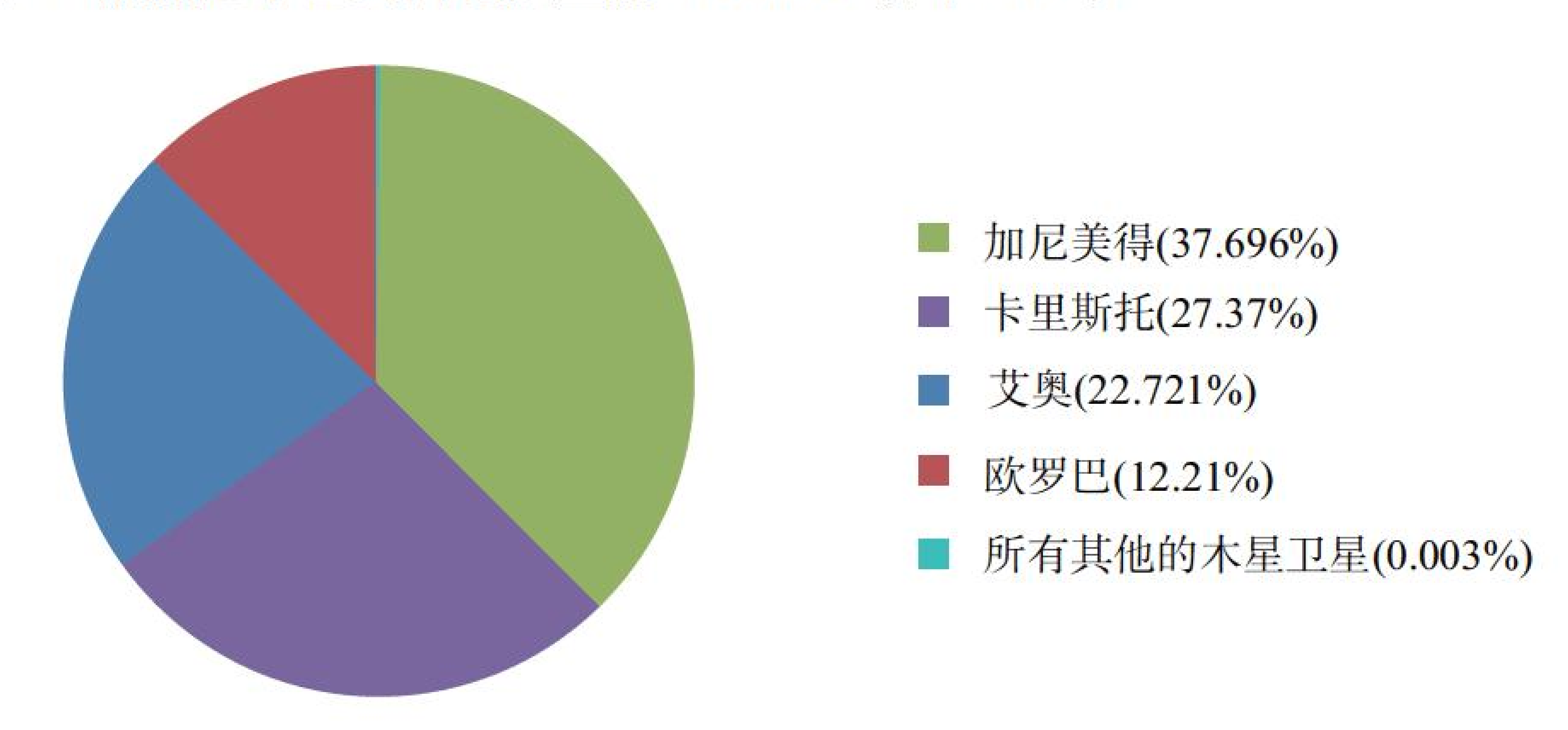


图 8.17　伽利略卫星的质量比例

最早发现这 4 颗木星卫星的人，是我们的老朋友伽利略。前面说过，他是世界上第一个用望远镜仰望夜空的人。就像是《一千零一夜》中的阿里巴巴，伽利略一头钻进了一个巨大的宝藏，并且发现了一大堆珍宝。其中就包括他于 1610 年发现的这 4 颗木星卫星。

发现了 4 颗新卫星，接下来自然就要给它们取名字。伽利略决定借此机会，向一个意大利的权贵家族拍马屁。

1605 年，伽利略被美第奇家族雇佣，给一个叫科西莫 · 德 · 美第奇的 15 岁男孩当数学老师。4 年后，这个男孩成了托斯卡纳大公。又过了 1 年，伽利略就发现了这 4 颗木星卫星。为了讨托斯卡纳大公的欢心，伽利略就给他的前学生写信，问他应该把这 4 颗卫星命名为科西莫之星还是美第奇之星。为了照顾自己 3 个弟弟的情绪，托斯卡纳大公回信说最好叫美第奇之星。

1610 年 3 月 19 日，伽利略向托斯卡纳大公寄去了他刚写好的《星空信使》。在这本书中，伽利略把这 4 颗卫星正式命名为美第奇之星。与书一起寄去的，还有他用来发现木星卫星的那个望远镜。

伽利略这种公然拍权贵马屁的行为引起了学术界的极大不满。大家纷纷抵制美第奇之星的叫法。后来德国天文学家西门·马里乌斯用宙斯的 4 个情人（即艾奥、欧罗巴、加尼美得和卡里斯托）为这 4 颗卫星命了名，这才得到学术界的一致认可。后来，为了纪念伽利略，人们也把这 4 颗卫星称为伽利略卫星。

在这 4 颗伽利略卫星中，最早成为学术界关注焦点的是木卫一。让它“一夜成名”的人，是丹麦天文学家奥勒 · 罗默（图 8.18）。事实上，正是通过对木卫一的观测，罗默第一个证明了光速其实是有限的。



图 8.18　奥勒 · 罗默

为了解释罗默如何发现光速有限，我要先来解释一个概念：木卫一蚀。观测表明，木卫一是离木星最近的卫星，大概 42.5 小时就能绕木星转上一圈。前面说过，太阳系中所有的天体几乎都在同一个平面上运动。因此，当木卫一绕到木星背后的时候，就会被木星挡住，使地球上的人无法再看到它。这个现象就是“木卫一蚀”。

知道了什么是木卫一蚀，我们就可以来讲为什

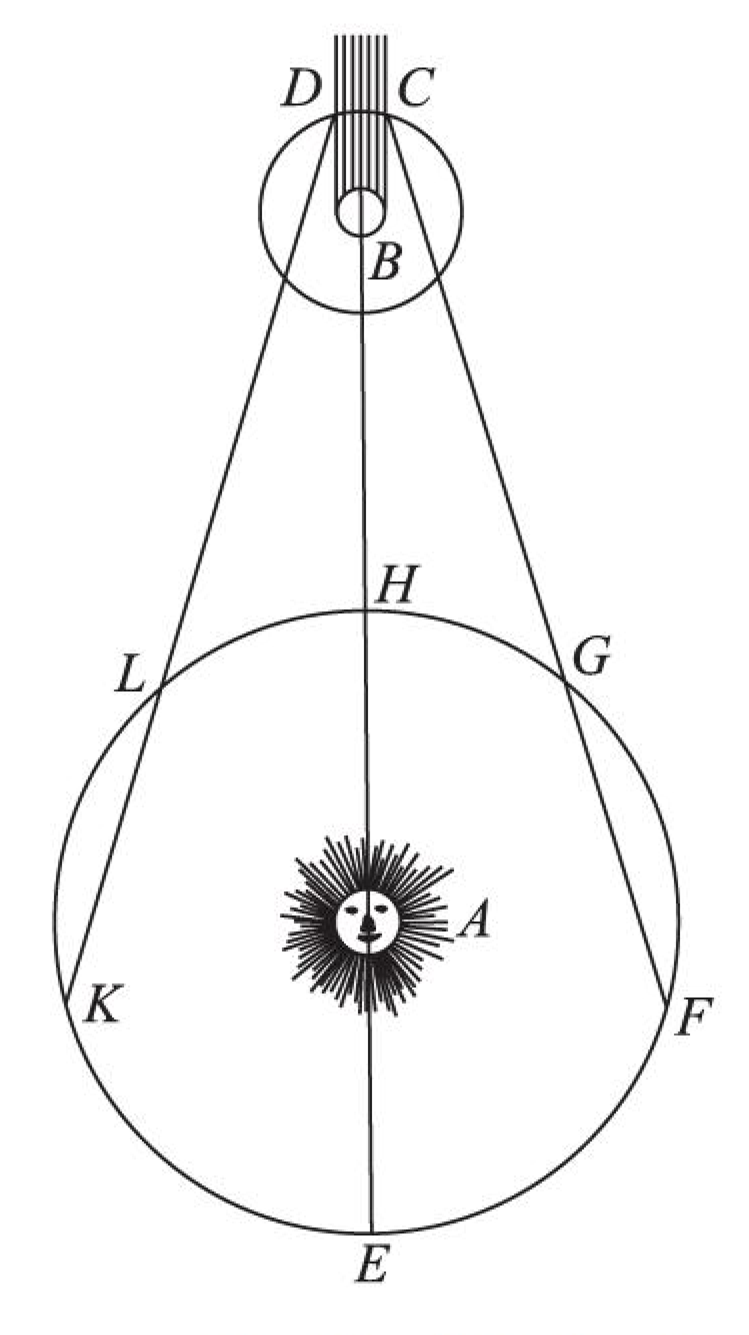


图 8.19　用木卫一蚀证明光速有限的原理图

么光速会有限了。图 8.19 就是罗默当年用来证明光速有限的原始图片。图中的 *A* 点是太阳，环绕它的大圆是地球的运动轨道；而 *B* 点是木星，环绕它的小圆是木卫一的运动轨道。木卫一按逆时针的方向绕木星旋转；当它处于 *C* 点和 *D* 点之间，就会被木星遮住，从而出现木卫一蚀。

在地球上可以记录木卫一刚进入木星阴影（*C* 点）或刚离开木星阴影（*D* 点）的时刻。通过计算木卫一连续两次到达 *C* 点或 *D* 点的时间间隔，就可以测出木卫一绕木星转上一圈的时间。如果光速是无限的，那么无论地球离木星是远是近，我们看到的木卫一连续两次到达 *C* 点或 *D* 点的时间间隔将恒定为 42.5 小时。

但罗默的观测表明，真实情况并非如此。显然，地球按逆时针的方向绕太阳旋转。当地球逐渐接近木星的时候（从 *F* 点运动到 *G* 点），实际观测到的木卫一连续两次到达 *C* 点的时间间隔会越来越小。反过来，当它逐渐远离木星的时候（从 *L* 点运动到 *K* 点），实际观测到的木卫一连续两次到达 *D* 点的时间间隔会越来越大。这意味着，光从木星周围传到相距较近的 *G*、*L* 两点所花的时间较短，而传到相距较远的 *F*、*K* 两点所花的时间较长。这就有力地证明了光速确实是有限的。

接下来，我们来聊聊木卫一（图 8.20）本身。

最初，人们都认为木卫一应该像月球，是一个遍布陨石坑的不毛之地。但 1979 年，旅行者 1 号空间探测器传回了木卫一的高清照片，却让所有人都大跌眼镜。

可以看到，木卫一非常像一个鸡蛋葱花饼。它的地表被大片的黄色覆盖，上面全是非常平坦的平原，此外还零零星星地点缀着一些相当矮小的山峰。可能你会问了：“为什么木卫一长得这么像鸡蛋葱花饼呢？”

答案是大家在日常生活中颇为熟悉的摩擦生热。

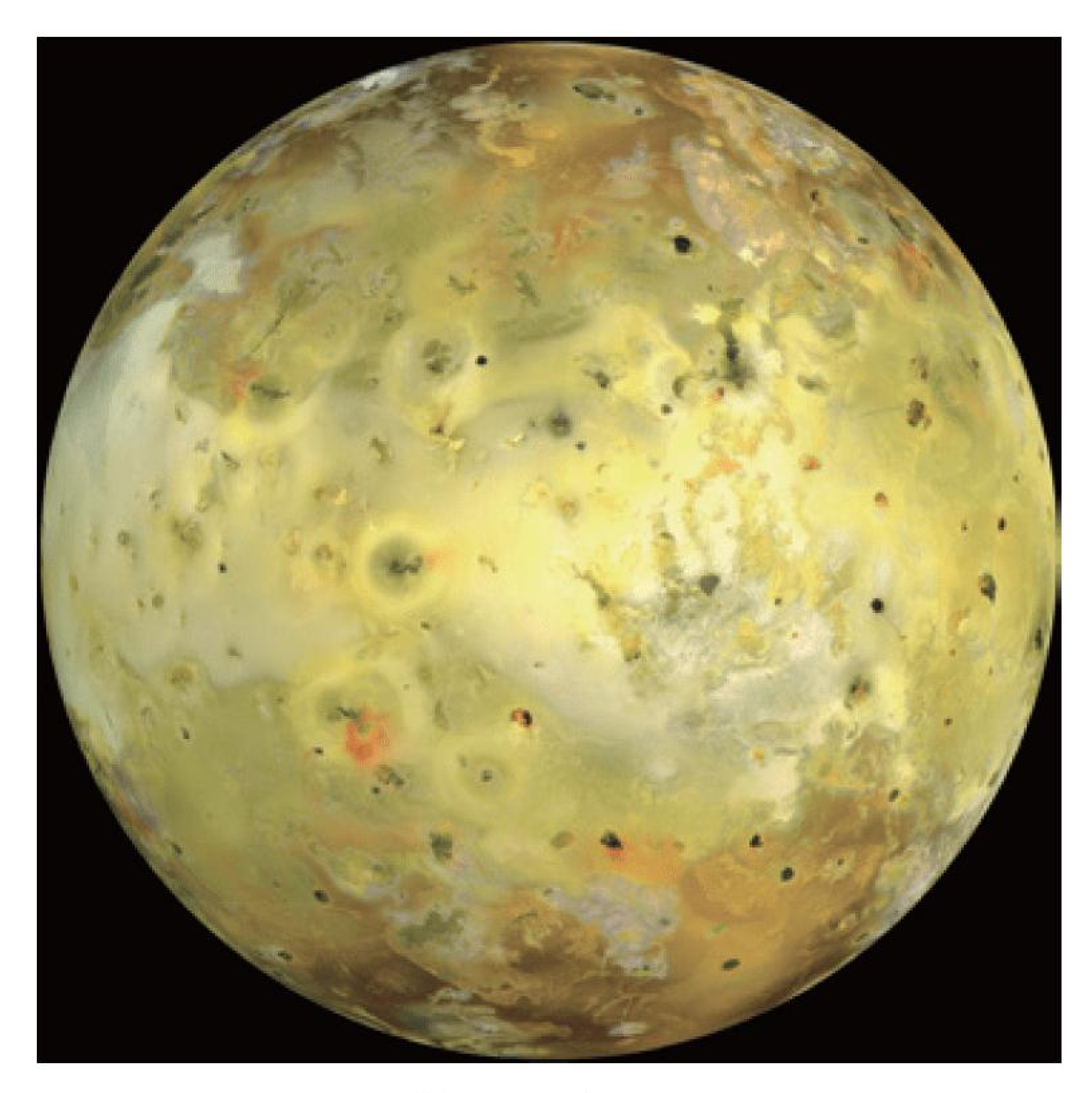


图 8.20　木卫一

前面说过，木星是太阳系行星中的巨无霸，其质量是太阳系其他行星质量总和的 2.5 倍。除此以外，木卫二、木卫三和木卫四的质量也与木卫一处于同一个量级。这 4 个天体的潮汐力把木卫一拉来扯去，从而通过摩擦生热的方式在木卫一内部产生了巨大的能量。

类似于地球，木卫一内部的能量会以火山爆发的形式释放出来。事实上，木卫一是整个太阳系中火山活动最频繁的天体，目前拥有超过 400 座活火山；这些活火山口，就是鸡蛋饼上的那些葱花。剧烈的地质活动填平了早期陨石撞击所产生的大坑，让木卫一表面全是平坦的平原。此外，火山爆发也产生了大量的硫黄和硫化物；这些硫化物覆盖在木卫一的表面，就让木卫一变成了黄色。顺便多说一句，由于其表面覆盖着太多的硫化物，木卫一无疑是全世界最恶臭难耐的“鸡蛋葱花饼”。

我们来做个总结。1610 年，伽利略发现了 4 颗木星卫星，即木卫一、木卫二、木卫三和木卫四。在这 4 颗伽利略卫星中，木卫一最早成为学术界关注的焦

点。通过观测木卫一蚀，罗默第一个证明了光速其实是有限的。1979 年，旅行者 1 号传回了木卫一的高清照片，显示木卫一其实是一个巨大的“鸡蛋葱花饼”。之所以会变成这个样子，是由于木星、木卫二、木卫三和木卫四的潮汐力把木卫一拉来扯去，从而通过摩擦生热的方式在木卫一内部产生了巨大的能量，进而把木卫一变成了太阳系中火山活动最频繁的天体。火山爆发产生的大量硫化物覆盖在木卫一的表面，就把木卫一变成了黄色，同时也把它变成了全世界最恶臭难耐的“鸡蛋葱花饼”。

很长一段时间，木卫一都是名气最大的伽利略卫星。但到了 20 世纪末，情况却突然发生了改变。



太阳系最大的海洋是怎么被发现的?

离开了木卫一，让我们前往一个让天文学家浮想联翩的梦幻之地，那就是木卫二，也叫欧罗巴（图 8.21）。

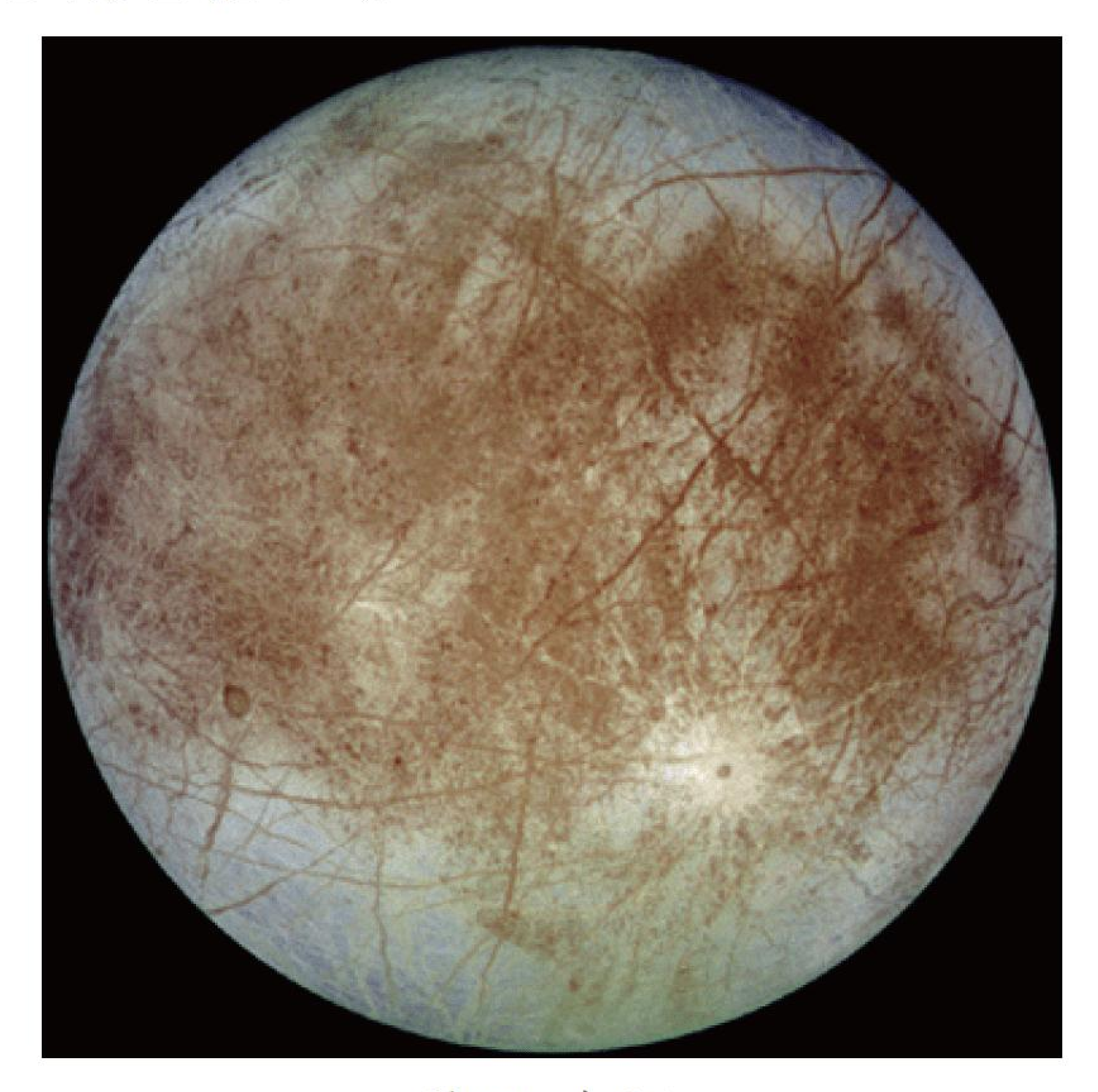


图 8.21 木卫二

1979 年 7 月 9 日，旅行者 2 号空间探测器从木卫二的上空飞掠而过，从而首次拍下了木卫二的高清照片。这些照片表明，木卫二是一个典型的冰封世界；换句话说，整个木卫二都被厚厚的冰层所覆盖。诡异的是，木卫二上几乎没有任何陨石坑，而有不少形如沟壑的条纹。前面说过，只有天体本身的地质活动才能够消除陨石坑。这意味着，木卫二也是一个拥有相当活跃的地质活动的天体。

但让木卫二一夜成名的，是 NASA 于 1989 年发射的伽利略号木星探测器（图 8.22）。1995 年，伽利略号掠过木卫二，并做出了一个非常惊人的发现：在木卫二厚厚的冰层之下，其实隐藏着整个太阳系最大的液态海洋。



图 8.22　伽利略号木星探测器

可能你要问了："伽利略号根本无法穿越木卫二厚厚的冰层，那它如何发现冰层下有液态海洋？"答案是通过电磁感应现象。

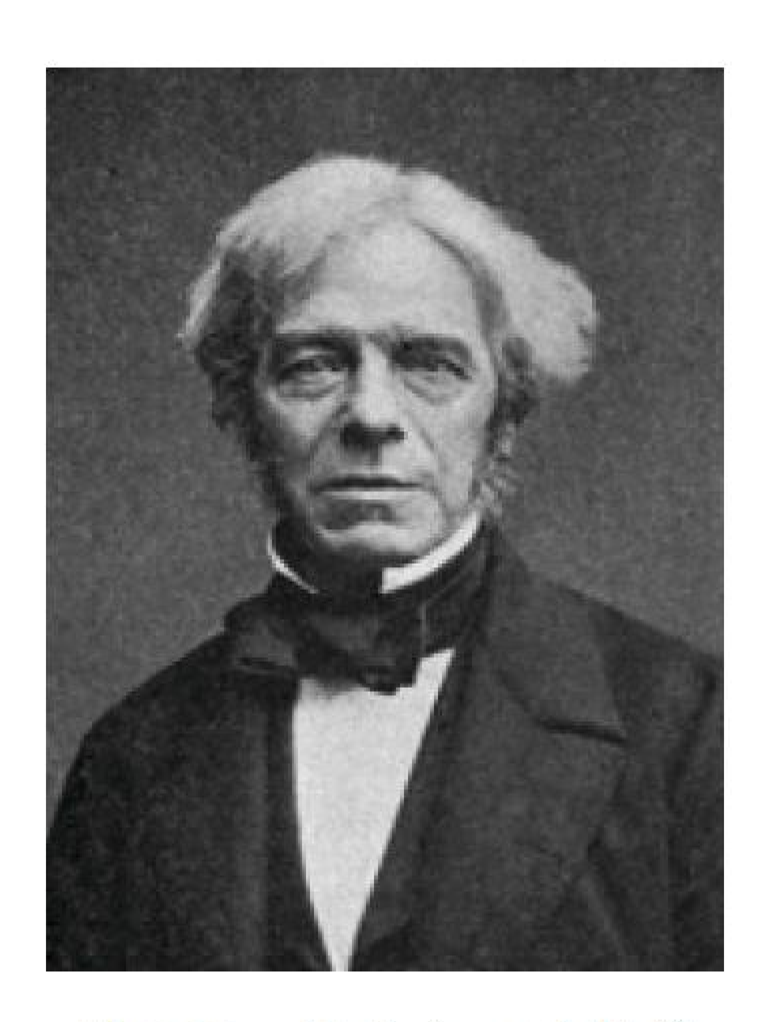


图 8.23　迈克尔·法拉第

说起电磁感应现象，就不能不提到一个人，他就是英国大物理学家迈克尔·法拉第（图 8.23）。

日本"经营之圣"稻盛和夫在他的《活法》一书中说到，成功的秘诀就是"努力到连老天爷都忍不住要帮你"。这句话堪称法拉第一生的写照。

1791 年 9 月 22 日，法拉第出生在伦敦郊区的一个铁匠的家庭。由于家境贫寒，他没上完小学就辍了学。14 岁那年，他跑到一个书店老板的家里当学徒。在忙碌的工作之余，法拉第通过大量阅读他老板的藏书，补上了自己缺失

的基础教育。

在法拉第 20 岁生日的那一天，一个书店的老顾客给他送了一份改变他一生命运的礼物。那是一张英国皇家学会举办的系列科学讲座的门票，而主讲人是英国著名化学家汉弗里·戴维。法拉第如饥似渴地听了戴维的讲座，并把他的笔记整理成了一本 300 多页的书，然后送给了戴维。这让戴维对他刮目相看。

一年后，戴维在一次化学实验中伤到了自己的眼睛，这让他决定雇一个助手。很自然地，他就想到了曾给自己留下深刻印象的法拉第。科学殿堂的大门，就这样向法拉第敞开。

当然，法拉第此后的人生之路并非一马平川。1813 年，他陪同戴维踏上了一场欧洲大陆之旅。在这次旅行中，他遇到了戴维的妻子。

戴维的妻子出身于英国上流社会，非常瞧不起出身贫寒的法拉第。她把法拉第当成了一个佣人，不许他乘坐马车，还强迫他和佣人同桌吃饭。受到了侮辱的法拉第曾经一度考虑要独自回国并另谋出路。但最后，他还是忍了下来。

开始的时候，法拉第一直在追随戴维研究化学。但几年后，他的兴趣转向了电磁学。1820 年，丹麦物理学家汉斯·奥斯特（图 8.24）用实验证明通电的导线能让与它平行放置的小磁针发生偏转；换言之，他发现电其实可以转化为磁。

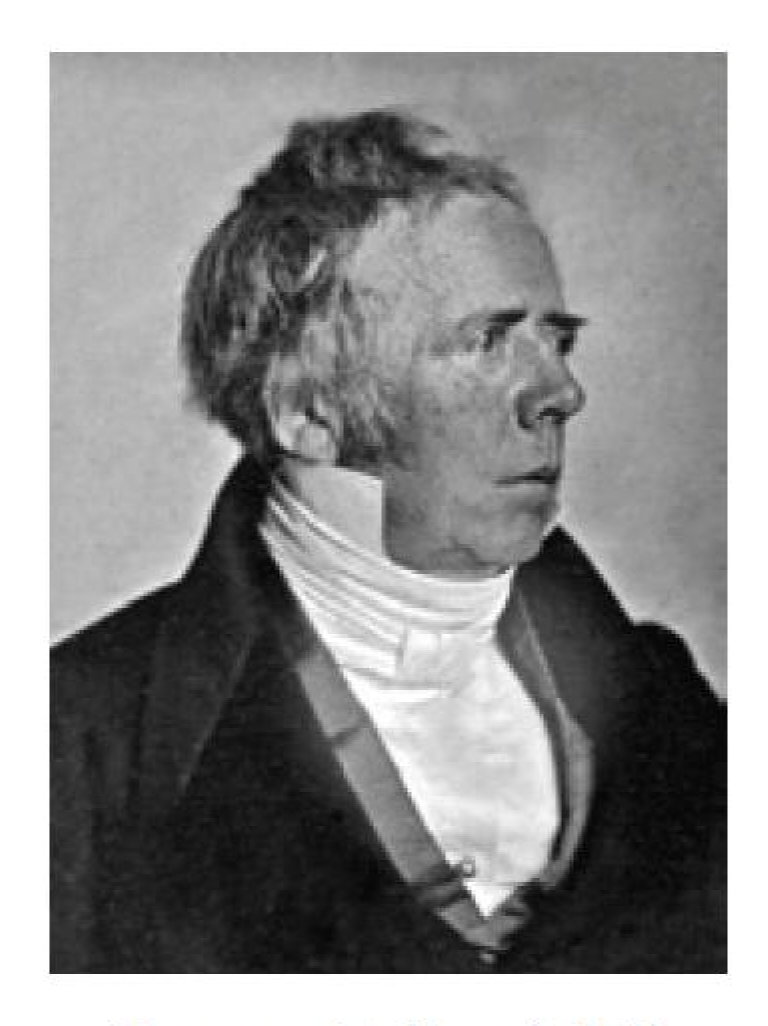


图 8.24　汉斯·奥斯特

这个实验引起了法拉第极大的兴趣。他就想了：“既然电可以转化为磁，那磁能否转化为电呢？”

从 1821 年开始，为了证明这个猜想，法拉第奋斗了整整 10 年。1831 年，他终于取得了重大突破，做出了他一生中最重要的发现，那就是著名的电磁感应。

图 8.25 就是法拉第发现电磁感应所用的原始实验装置。它的设计思路如下。最右边的仪器是一个电池，它能为线圈 A 供电；由于电能生磁，通电之后，线圈 A 就会产生磁场。这时在线圈 A 的外面再套一个更大的线圈 B，而线圈 B 的两端又与左边的电流表相连。如果磁也能生电，线圈 B 的导线上就会产生电流，从而让左边电流表的指针发生偏转。

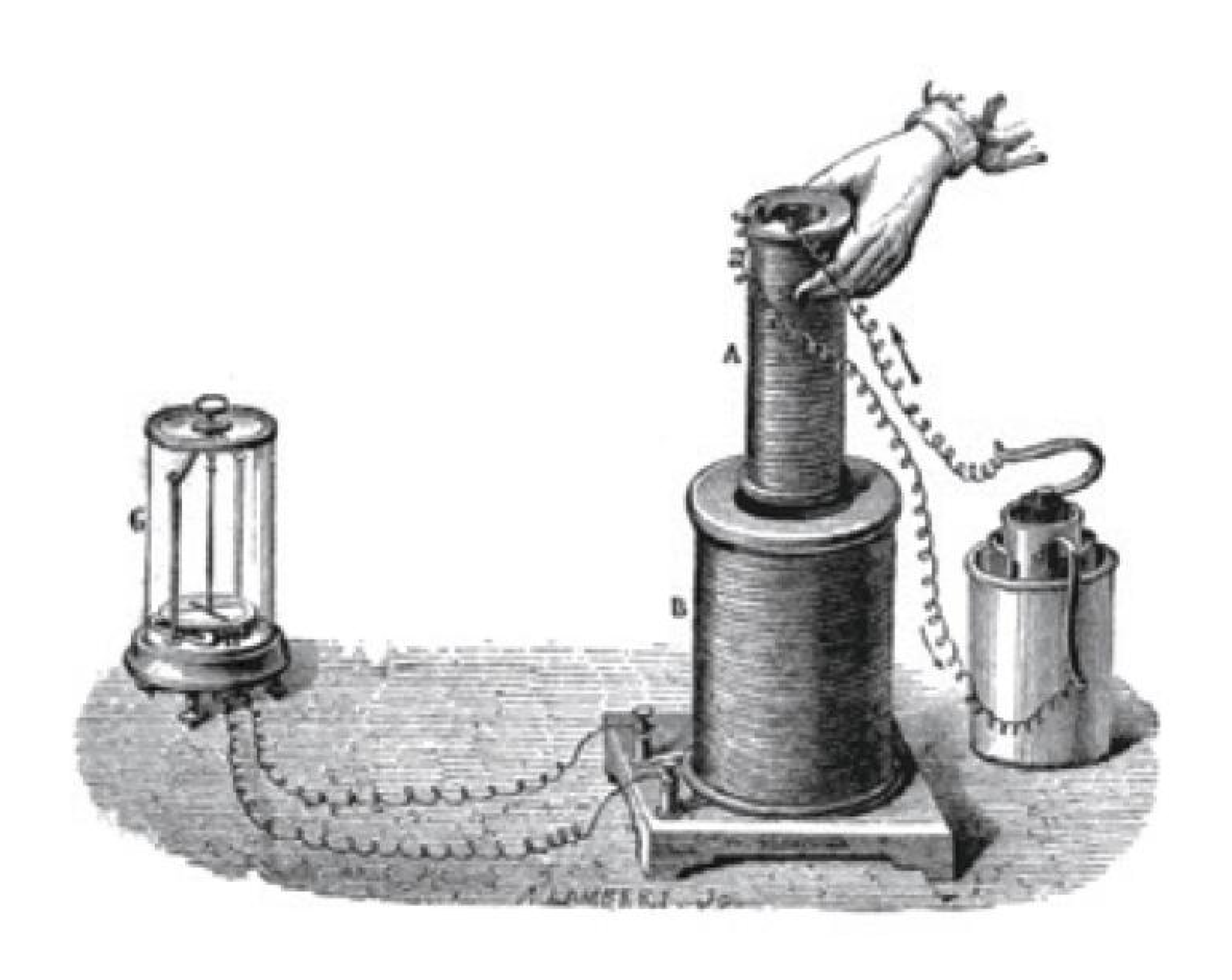


图 8.25　电磁感应实验装置

但很长一段时间，这个实验的进展都很不顺利。做实验的时候，法拉第会先把线圈 A 放进线圈 B 的内部，然后再通电流；但每一次，他都失望地看到电流表的指针根本纹丝不动。直到有一次，他无意间打乱了正常的操作流程，先通电流，然后再把线圈 A 放入线圈 B。就在线圈 A 放入线圈 B 的一刹那，法拉第期待了整整 10 年的事情终于发生了：电流表的指针终于发生了偏转。经过反复的实验后，法拉第终于确认，磁场本身并不能产生电，能产生电的其实是磁场的变化。正是这个著名的电磁感应实验，开启了人类的电力时代。

后来，英国大物理学家麦克斯韦（图 8.26）写下了著名的麦克斯韦方程组，从而精辟地描述了电与磁的转化关系：“变化的电场才会产生磁场，变化的磁场才会产生电场。”



图 8.26　麦克斯韦

明白了电与磁的转化规律，下面我们就可以来解释伽利略号到底如何发现木卫二的内部海洋了。

1995 年，伽利略号在掠过木卫二的时候，发现木卫二存在微弱的磁场。进一步研究表明，这个磁场并不是木卫二自己产生的，而是由木星的磁场诱导出来的。

下面我们就分析一下，木星的磁场为什么会诱

导出木卫二的磁场。事实上，这个过程需要分两个步骤来完成：①变化的木星磁场产生木卫二的电场；②变化的木卫二电场产生木卫二的磁场。

先说第一步。很明显，木卫二在以椭圆轨道环绕木星旋转。而在这个轨道上，木星的磁场强度不尽相同。这样一来，变化的木星磁场就会诱导出木卫二的电场。

关键在于第二步：木卫二的电场如何诱导出木卫二的磁场？要想做到这一点，必须让电流从木卫二的内部流过。前面说过，木卫二的外壳是厚厚的冰。如果木卫二的内部也是固态的冰，由于冰本身的导电性能不佳，木卫二的内部就不会产生电流，也就不可能产生磁场。这显然与伽利略号的实际观测不符。换句话说，要想产生磁场，木卫二的冰层下面就必须有一个导电性能良好的液态盐水海洋。

通过分析伽利略号收集到的数据，天文学家估算出，木卫二内部海洋的总体积应该在地球海洋总体积的两倍以上（图 8.27）。这也让它成为全太阳系中最大的海洋。

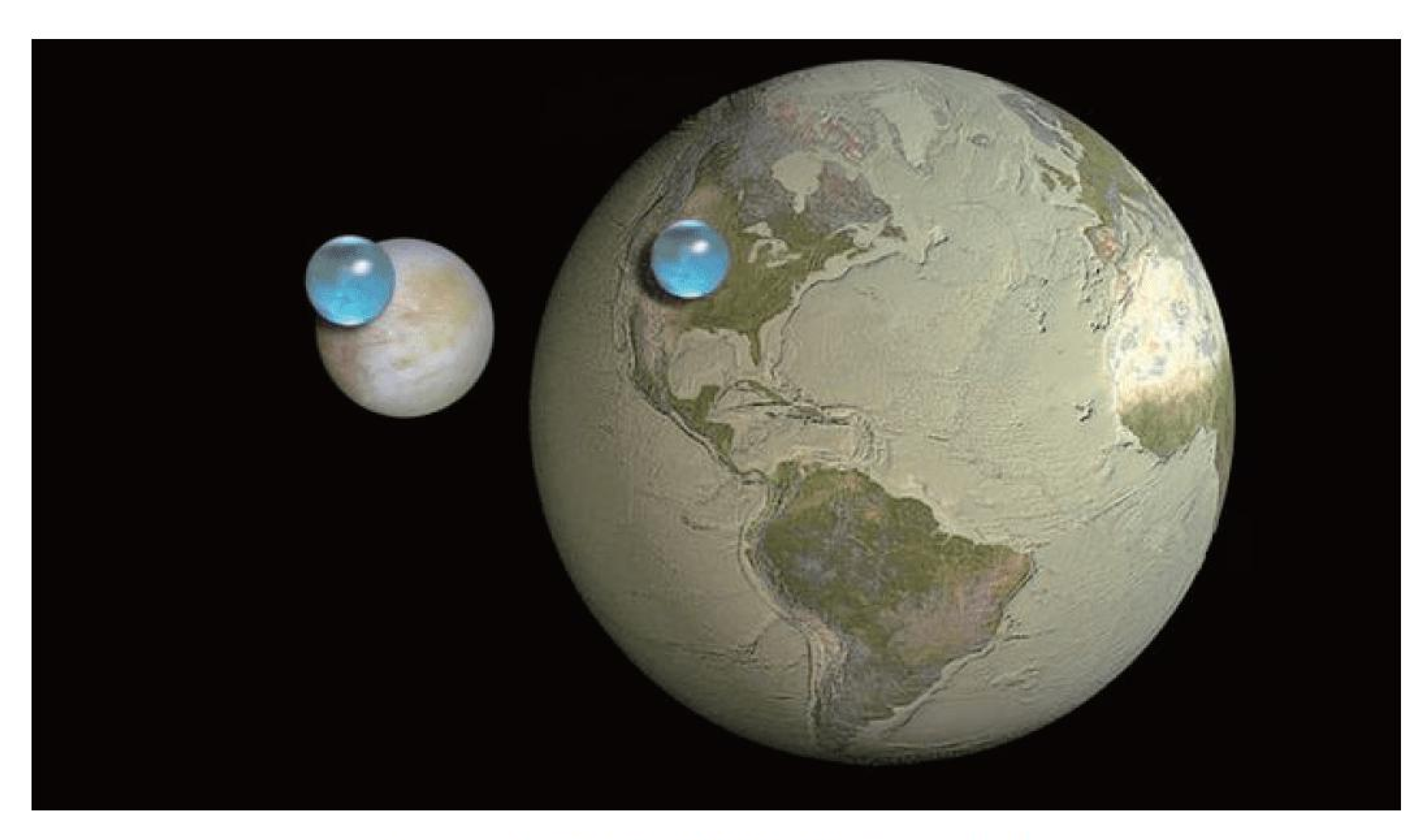
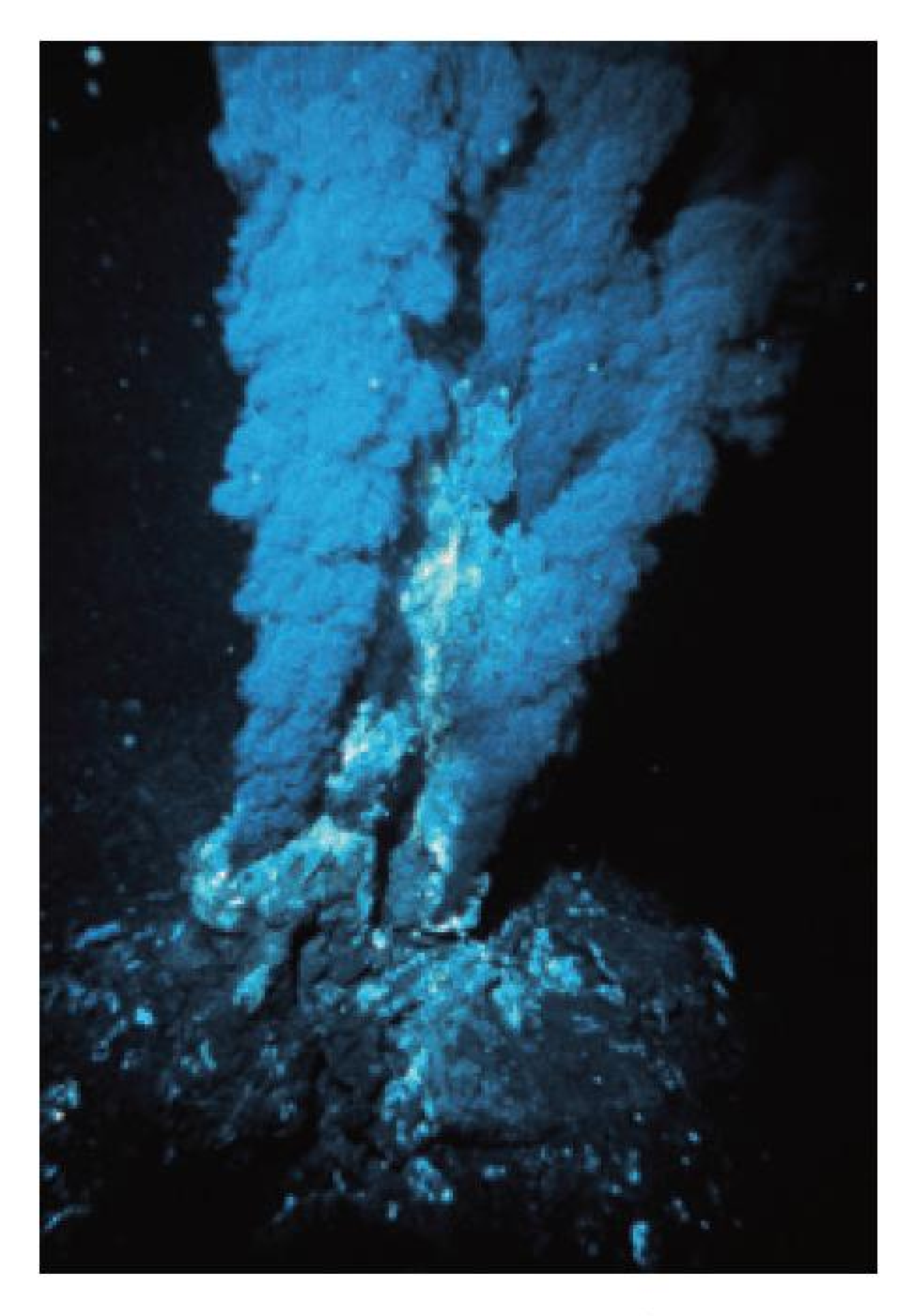


图 8.27　木卫二和地球的海洋总体积的对比

其实仔细想想，木卫二内部有液态海洋并不是什么奇怪的事情。我们前面讲过，木星和其他几颗伽利略卫星的潮汐力会把木卫一拉来扯去，从而通过摩擦生热的方式，把木卫一变成太阳系中火山活动最频繁的天体。同样的道理，木星和其他几颗伽利略卫星的潮汐力也会把木卫二拉来扯去，从而在木卫二的内部产生巨大的热量；这些热量融化掉木卫二内部的冰，就形成了太阳系最大的海洋。


图 8.28　深海热泉

最后一个，也是最激动人心的问题是，在木卫二内部的巨大海洋里，会不会有生命的存在？

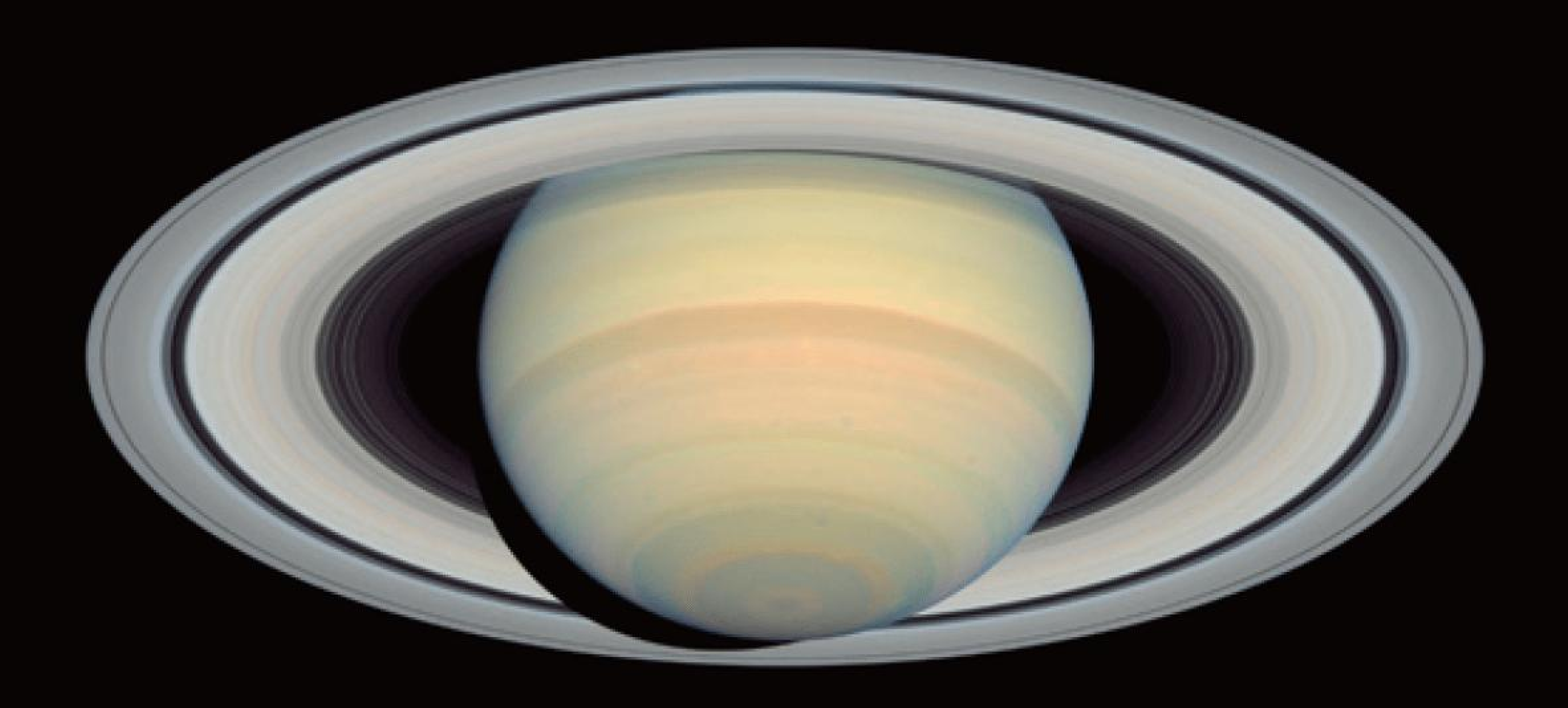
目前，人们还没有在木卫二上找到任何生命存在的证据。不过，科学家们已经在地球上找到了一些与木卫二内部颇为相似的地方，并在这些地方发现了生命的存在。而这些地方，就是所谓的深海热泉（图 8.28）。

众所周知，海底火山爆发后会留下海底裂缝。冷海水沿海底裂缝向下渗流，会受到更下层的岩浆加热，然后被反喷回海底而形成深海热泉。这些喷泉非常炽热，水温最高能达到 400℃。此外，喷泉中还包含着大量的硫化氢，这让它们都变成了强酸。按理说，一般的生物根本就不可能在这种高温强酸的深海热泉中生存。但在 1977 年，一些科学家潜入海底，然后在深海热泉中发现了一些不一般的生物。

这些生物就是所谓的化能合成细菌。它们能够以硫化氢为原料来合成各种有机物质，同时获得维生所需要的能量；而它们合成的各种有机物质，又为其他生物提供了食物来源。换句话说，化能合成细菌就是海底的“绿色植物”，是深海热泉生态系统的生产者。由于它们的存在，地球上的那些深海热泉附近才会变得充满生机。

事实上，木卫二的内部海洋拥有与地球深海热泉极为相似的环境。这让人不禁浮想联翩：那里是否也是一个生机盎然的世界？

我们来做个总结。1995 年，伽利略号掠过木卫二，并且发现木星的磁场诱导出了木卫二的磁场。根据法拉第发现的电磁感应规律，变化的电场才会产生磁场，变化的磁场才会产生电场。这意味着，木卫二要想产生磁场，其内部就必须有一个导电性能良好的液态盐水海洋。更深入的研究表明，在木卫二厚厚的冰层之下，其实隐藏着太阳系中最大的液态海洋。目前人们已经在与木卫二环境极为相似的地球深海热泉附近发现了生命。这让人不禁浮想联翩：木卫二的内部海洋是否也是一个生机盎然的世界？



09

土　星



9.1 人类如何知晓土星环的真面目?

离开了木星，让我们前往这次太阳系之旅的第九站: 土星（图 9.1）。

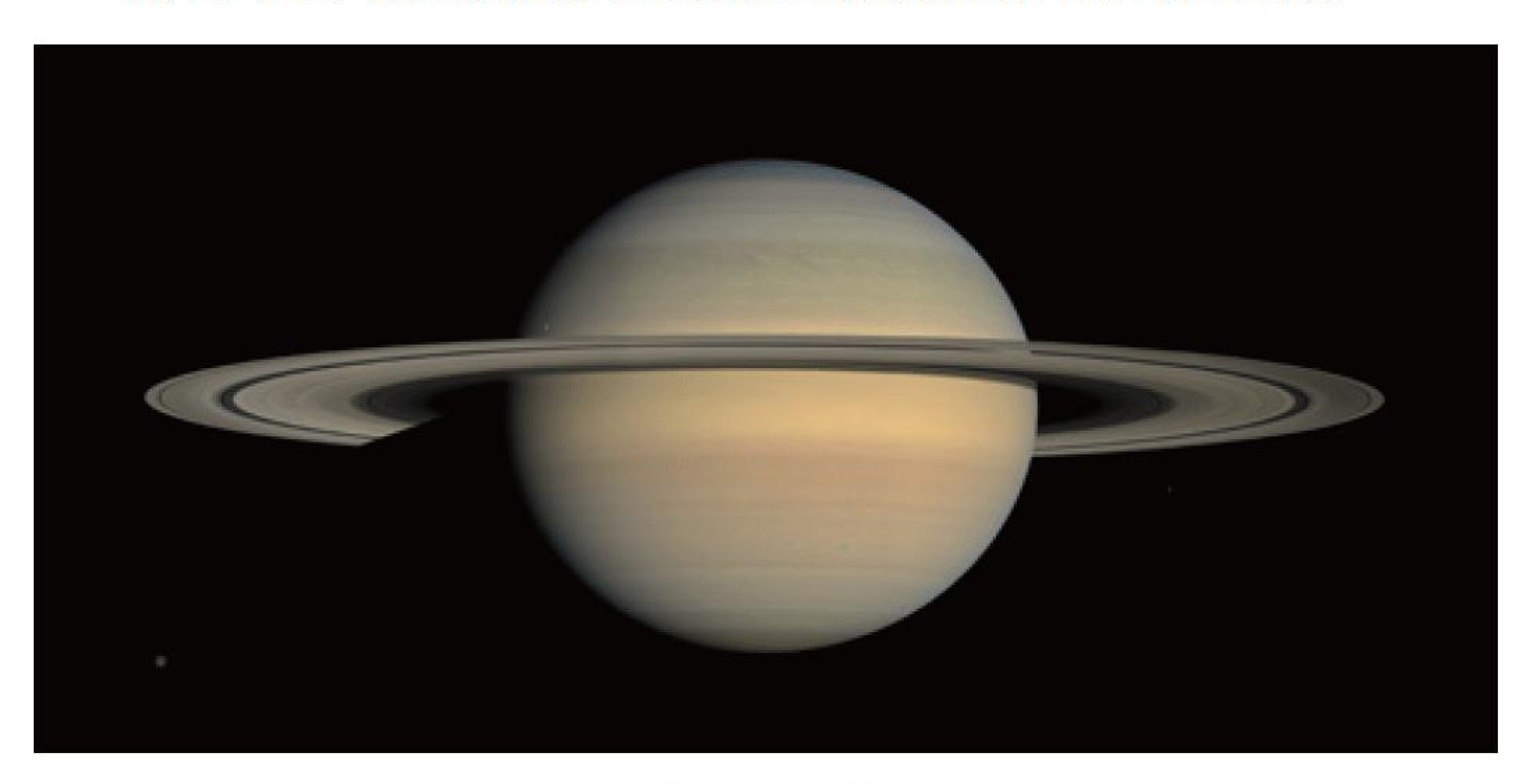


图 9.1　土星

质量：5.683×10^{26} 千克（地球质量的 95.2 倍）
体积：8.271×10^{23} 立方米（地球体积的 763.6 倍）
与太阳的平均距离：1.434×10^{9} 千米（日地距离的 9.6 倍）

土星是太阳系第二大的行星。与木星一样，土星也是一个没有固体表面的气态行星。它的直径超过地球直径的 9 倍。因此，尽管它的密度只有地球密度的 1/8，它的质量依然能达到地球质量的 95.2 倍。

提起土星，人们首先想到的就是它的巨大光环。毫无疑问，土星环是整个太阳系最壮丽的奇观之一。而最早看到土星环的人，是我们的老朋友伽利略。

前面多次提到过，1610 年，伽利略率先用望远镜仰望星空，并做出了一系列的重大天文发现，其中包括率先看到土星环。不过一向英明神武的伽利略，在观测土星时也摆了一回乌龙。由于望远镜的分辨率不够，他把自己看到的土星环

当成了位于土星两侧的两颗卫星，并把它们称为“土星的耳朵”。由于伽利略的巨大威望，这个错误的观点荼毒了学术界好几十年。直到 17 世纪中叶，才有人站出来驳斥伽利略的观点。此人就是荷兰大科学家克里斯蒂安·惠更斯（图 9.2）。



图 9.2 克里斯蒂安·惠更斯

在群星璀璨的 17 世纪，科学大佬们（例如前面提到过的牛顿、胡克和哈雷）几乎全都是百科全书式的人物。惠更斯也是如此。在数学领域，他发表了一篇名为《论赌博中的计算》的论文，从而成为了概率论的先驱之一；此外，微积分创始人之一的莱布尼茨也出自他的门下。在力学领域，他最早提出了动量守恒定律；此外，离心力和转动惯量的概念也是他最早提出的。在光学领域，他是世界上最早提出光是一种波的人之一。而在机械学领域，他发明了世界上的第一个摆钟和第一块怀表（图 9.3）。



图 9.3 惠更斯的摆钟

这样的牛人，自然也涉猎了天文学。1655 年，惠更斯用自己设计的望远镜仔细地观测了土星（图 9.4）。一年后，也就是 1656 年，他率先指出伽利略当年看到的，其实是环绕着土星的一个特别薄的圆环。

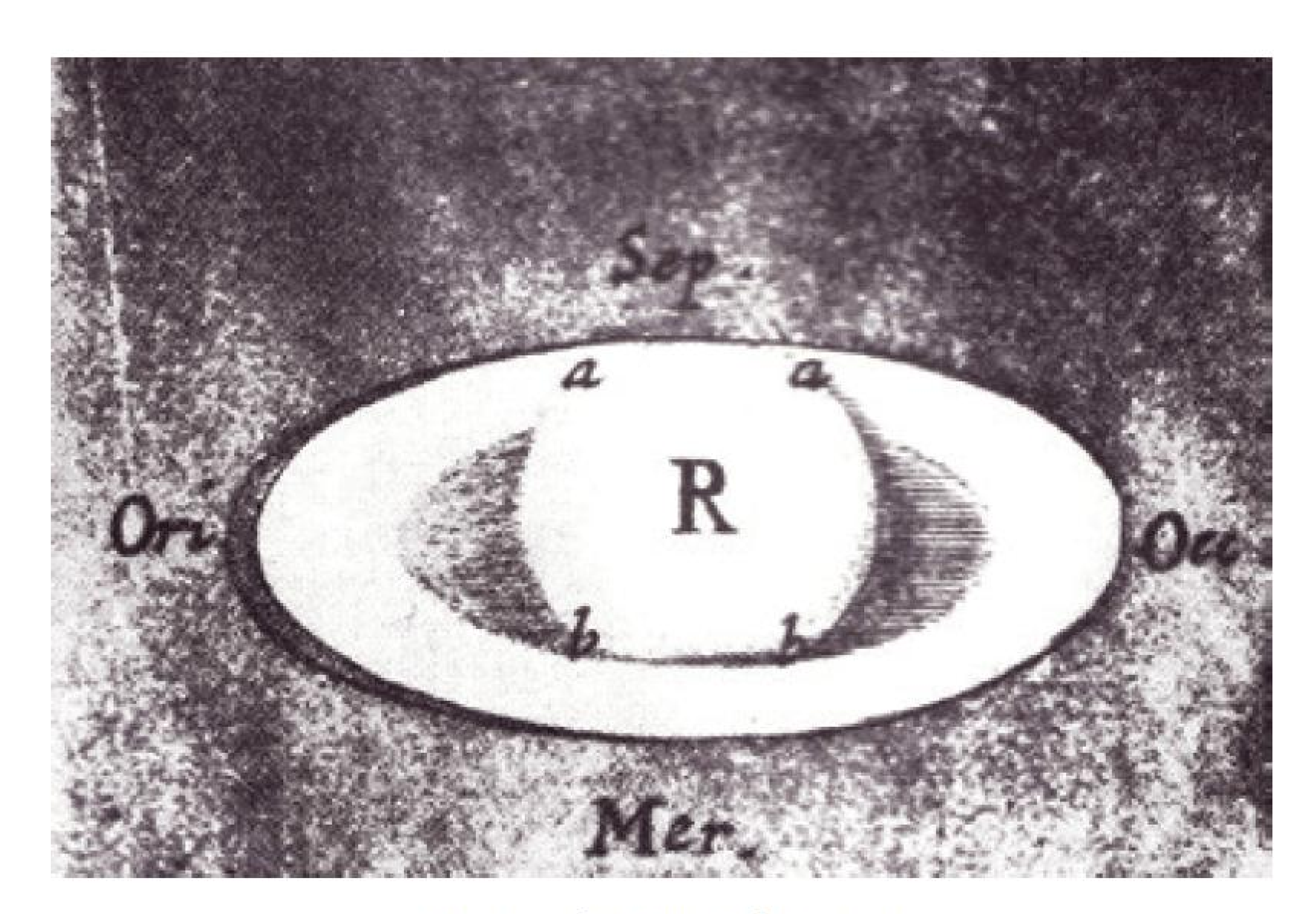


图 9.4　惠更斯眼中的土星


图 9.5　乔凡尼·卡西尼

那么问题来了：土星环到底是由什么东西构成的呢？最早揭开冰山一角的人，是意大利天文学家乔凡尼·卡西尼（图 9.5）。

卡西尼可谓是少年得志。25 岁那年，他就当上了世界上最古老大学（即博洛尼亚大学）的天文学教授。不过他之所以能坐上这个位置，并不是因为他在天文学上有多高的造诣，而是因为他特别精通占星术。在那个年代，博洛尼亚的王公贵族们都特别信这个。

当上天文学教授以后，卡西尼的兴趣逐渐转向了天文学。随着他对天文学的研究越来越深，卡西尼渐渐站到了占星术的对立面上。但讽刺的是，由于他以前作为占星师的名气太大，跑来找他占卜的人依然络绎不绝。

45 岁那年，他应法国国王路易十四的邀请，跑到法国去筹建巴黎天文台，并成为这个著名天文台的首任台长。

在巴黎，卡西尼迎来了自己事业的巅峰。他做出了很多非常重要的科学贡献。比如说，他发现了 4 颗土星的卫星，分别是土卫三、土卫四、土卫五和土卫八；后来为了讨法国国王的欢心，他就把这 4 颗卫星命名为“路易之星”。此外，他

也利用我们在游览金星时介绍过的三角视差的方法，首次测出了地球到火星的距离。

作为巴黎天文台的台长，卡西尼还有一个很重要的任务，那就是绘制法国地图。他组织过一次大型的地理测绘活动，相当准确地测出了法国的国土面积。最后的测量结果远远小于人们原来的预期。所以路易十四后来打趣地说道，卡西尼从他的手中夺走的土地，比他一生征战赢得的土地还要多。

尽管在天文观测方面硕果累累，卡西尼在天文理论方面却是一个十足的外行。事实上，他是一个有名的“乌鸦嘴”，专门反对正确的理论。举几个例子。卡西尼曾经公开反对开普勒的行星运动三定律、牛顿的万有引力定律以及罗默的光速有限理论。惠更斯因此嘲笑他，说他“只会整天抬头看星星”。

言归正传。1675 年，卡西尼做出了他一生中最重要的发现。他发现土星环其实并不连续，中间存在着一条黑色的裂缝，这就是著名的“卡西尼缝”。

卡西尼的发现为人类打开了一扇了解土星环的门。但要再等 112 年，才有人能走进那扇门。此人就是法国大数学家拉普拉斯（图 9.6）。



图 9.6 拉普拉斯

与亚里士多德一样，拉普拉斯年轻时也教过一个非常特殊的学生，他就是后来威震天下的拿破仑将军。拿破仑登上法兰西权力巅峰以后，投桃报李地让拉普拉斯做了内阁的内务部长。可惜没过多久，拿破仑就后悔了。他发现自己的老师虽然是一个伟大的数学家，却是一个极其平庸的行政官员。所以仅仅过了一个半月，他就把拉普拉斯的官职给免了。

被罢官后的拉普拉斯非常惶恐。为了讨拿破仑的欢心，他把花费自己多年心血写成的一本书献给了拿破仑，作为后者加冕法国皇帝的礼物。在这本名为《天体力学》的书中，拉普拉斯基于牛顿力学，计算了太阳系中所有行星的运动轨道。拿破仑看了书后质疑拉普拉斯：“在你这本关于宇宙的书中，为什么对上帝只字不提？”听到这个问题后，一直唯唯诺诺的拉普拉斯居然昂起了头，双眼直视拿破仑并异常坚定地回答道：“陛下，在我的理论中，不需要假设上帝的存在。”

正是在这本《天体力学》中，拉普拉斯率先证明了土星环必须由一大堆特别窄的固态圆环构成。

听起来有点悬乎？其实原因非常简单。我们前面已经多次提到潮汐力，也就是一个天体作用在另一个天体近端和远端处的引力差异。因为土星的质量是地球质量的 95 倍，所以它产生的潮汐力也比地球要强很多。在土星强大潮汐力的作用下，稍微宽一点的土星环都会被撕碎（图 9.7）。

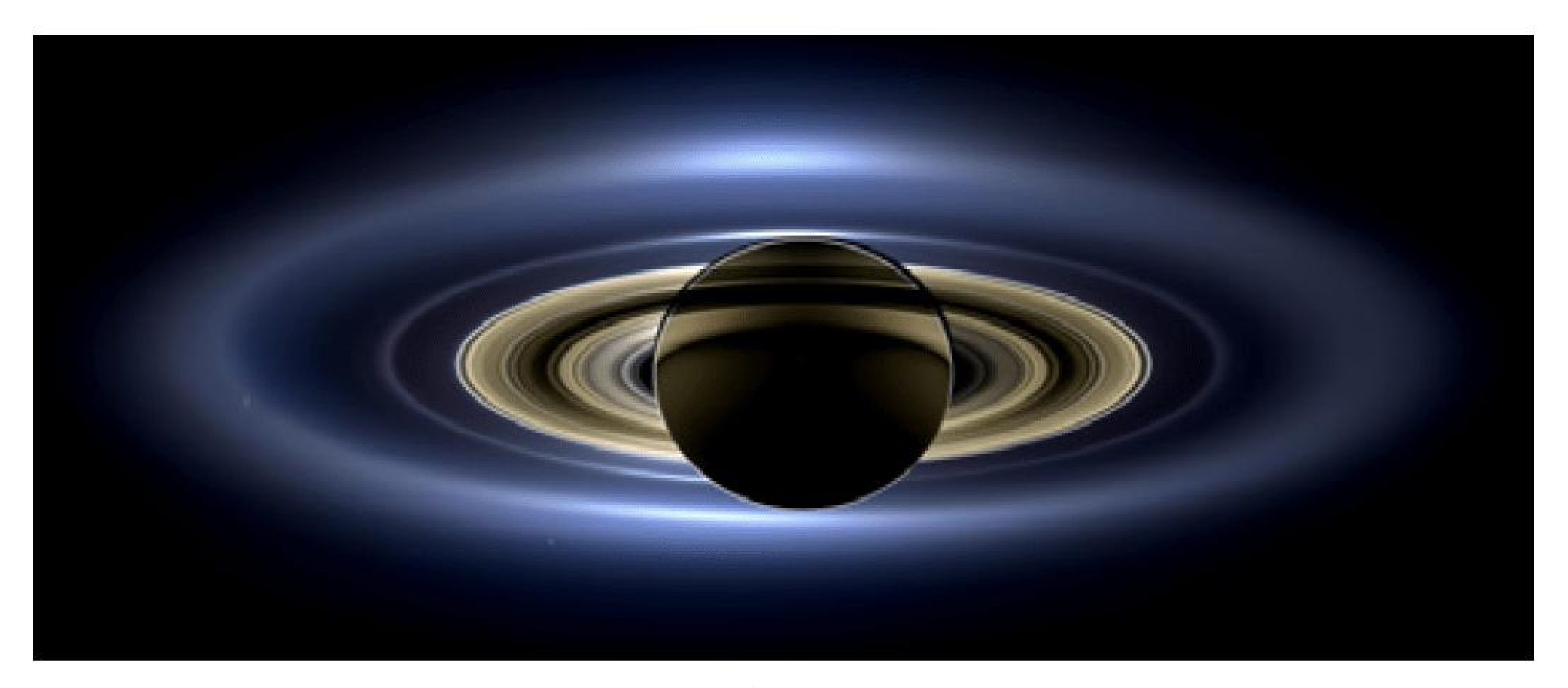


图 9.7　神秘的土星环



图 9.8　麦克斯韦

又过了 82 年，拉普拉斯的固态窄环理论也受到了驳斥。而驳斥它的人，就是英国大物理学家麦克斯韦（图 9.8）。

很多人都认为，麦克斯韦是仅次于牛顿和爱因斯坦、历史上第三伟大的物理学家。他最大的贡献是写下了麦克斯韦方程组，从而完成了电、磁、光之间的大统一。

不过麦克斯韦是一个十足的怪人。他从小就特别喜欢熬夜。在剑桥大学读书的时候，他更是养成了一个极端诡异的习惯，就是在凌晨 2 点的时候出去跑步。他跑步的地点是自己学院的宿舍楼：从一边楼梯跑下去，再从另一边楼梯跑上来。跑上几圈以后，沿途所有寝室的同学就差不多都被吵醒了；然后麦克斯韦就若无其事地回去睡觉，丝毫没意识到自己扰民。事实上，这个半夜跑步的

习惯伴随了麦克斯韦整整一生。

言归正传。1859 年，麦克斯韦通过理论计算发现，拉普拉斯所设想的固态窄环同样无法在土星潮汐力的作用下长期稳定存在。要想长期稳定存在，构成土星环必须是不计其数的固体小碎块。

在几乎没有任何观测数据的情况下，麦克斯韦就这样完全凭借着数学计算，发现了美丽的土星环的真相（图 9.9）。

到了 20 世纪后半叶，先后有 4 个空间探测器，分别是先驱者 11 号、旅行者 1 号、旅行者 2 号和卡西尼号，近距离地观察了土星的光环。这些探测器拍下的照片，让麦克斯韦的理论得到了证实。

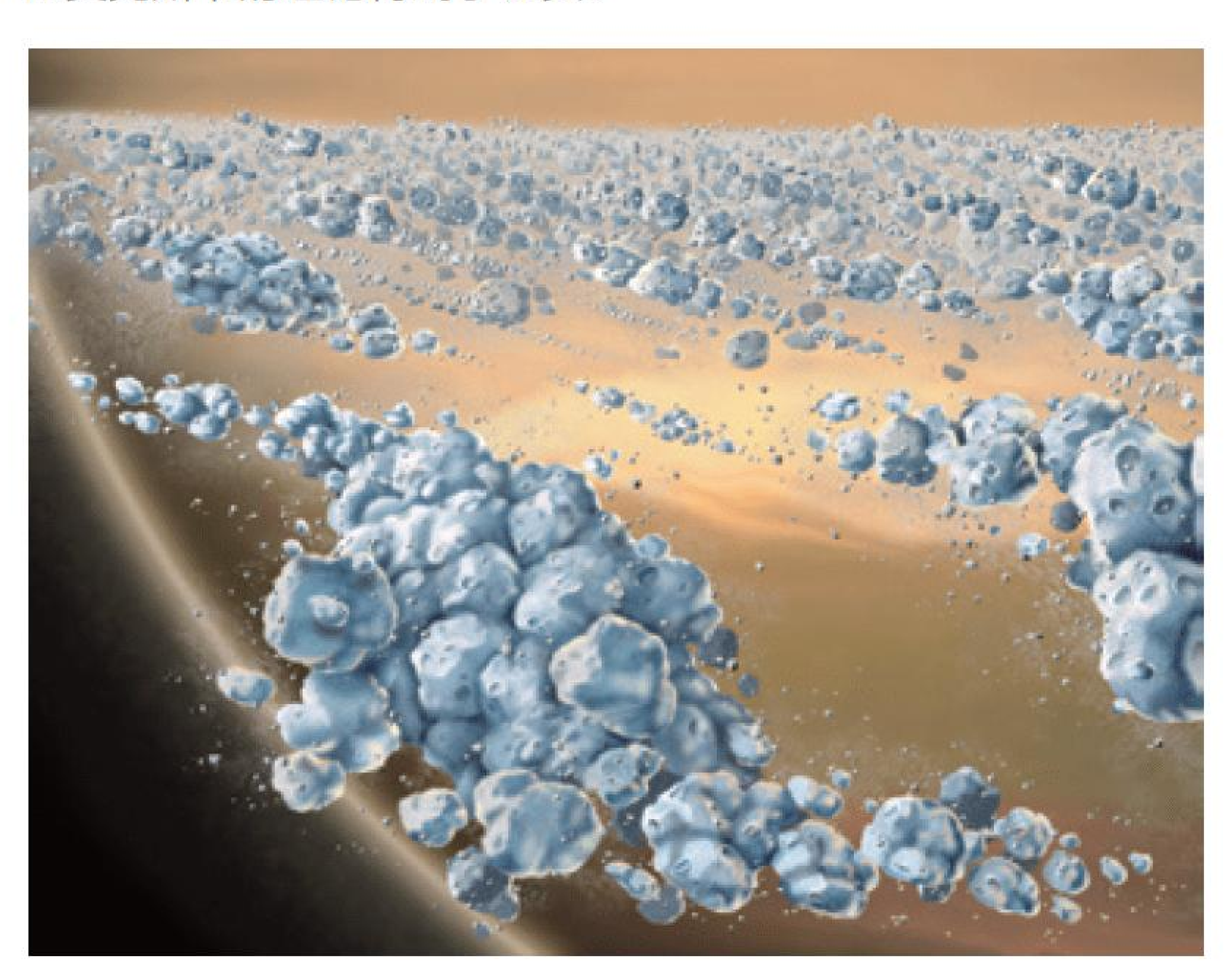


图 9.9 土星环的真相

让我们来看看土星环（图 9.10）的全貌。为了便于理解，你可以把土星环当成一张巨大的唱片。这张唱片上有大量的裂缝，光是宽带在 100 千米以上的裂缝就有 7 条之多。其中最显眼的是卡西尼缝，其宽带能达到 4800 千米。此外，这张唱片 99.9% 的部分，都是不计其数的小冰块，其尺寸从 1 厘米到 10 米不等；剩下的千分之一的部分，则是一些岩石碎块，与冰块一起绕土星旋转。

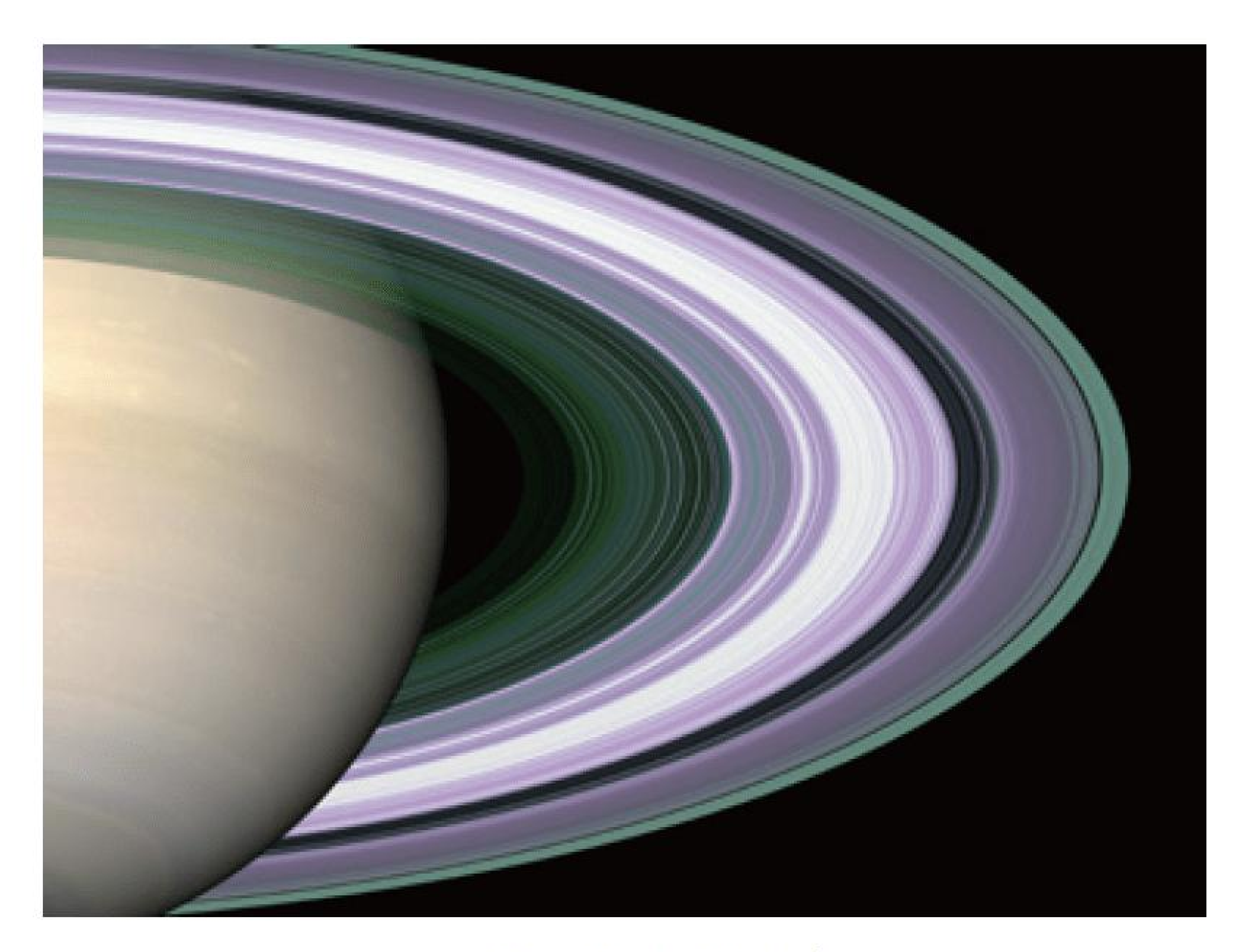


图 9.10　土星环的细节

最后再聊一个问题：土星环是怎么来的？目前主要有两种理论。

第一种理论认为，有一颗来自远方的大型彗星，因为落入土星的洛希半径之内而被土星的潮汐力摧毁。这颗彗星的岩石较重，就落入了土星；而这颗彗星的冰较轻，就留在原来的轨道上并形成了土星环。

第二种理论认为，这颗大型彗星撞上了土星的一颗卫星。剧烈的撞击将双方均彻底摧毁。同样地，两个天体的岩石落入了土星，而两个天体的冰形成了我们今天看到的土星环。

现在可以肯定的是，美丽的土星环源于一颗大型彗星的毁灭。但它到底是以哪种方式毁灭的，目前还没有定论。

我们来做个总结。毫无疑问，土星环是整个太阳系最壮丽的奇观之一。1610年，伽利略最早看到了土星环，但他误以为这是土星的两颗卫星。1656 年，惠更斯指出伽利略当年看到的其实是环绕着土星的一个特别薄的圆环。1675 年，卡西尼率先指出土星环的中间存在着一条黑色的裂缝，也就是所谓的卡西尼缝；这个发现，为人类打开了一扇了解土星环的窗户。1787 年，拉普拉斯在他的《天体力学》一书中，率先证明了土星环必须由一大堆特别窄的固态圆环构成，否则就会被土星的潮汐力撕碎。1859 年，麦克斯韦证明了拉普拉斯的固态窄环理论

同样有误；要想长期稳定存在，构成土星环必须是不计其数的固体小碎块。到了20世纪后半叶，土星探测器拍下的照片，证实了土星环确实由不计其数的冰块构成。麦克斯韦就这样完全凭借着数学计算，发现了土星环背后的真相。

我已经介绍了土星上最有名的奇观：美丽的土星环。下一节，让我们一起去探访土星的卫星世界。



9.2 谁是太阳系中最有可能存在地外生命的天体？

就目前所知，土星总共拥有 62 颗卫星，在太阳系中排名第二。在这 62 颗卫星中，名气最大的有两颗，那就是土卫二和土卫六。

这一节，我们先来聊聊土卫二（图 9.11）。



图 9.11　土卫二

土卫二别名恩克拉多斯。和前面游览过的木卫二一样，土卫二也是一个冰封的世界；换言之，它的表面也被冰层所覆盖。不过土卫二的块头很小，其直径只有 500 千米，大概是木卫二直径的 1/6。这让它看上去就像是一个冰冻的汤圆。

尽管早在 1789 年就已经被人类发现，但土卫二真正为人类所熟知，还要归

功于 1997 年发射的卡西尼－惠更斯号土星探测器（图 9.12）。事实上，之所以探测器会叫这个名字，是为了纪念我们前面提到过的意大利天文学家乔凡尼·卡西尼和荷兰科学家克里斯蒂安·惠更斯。

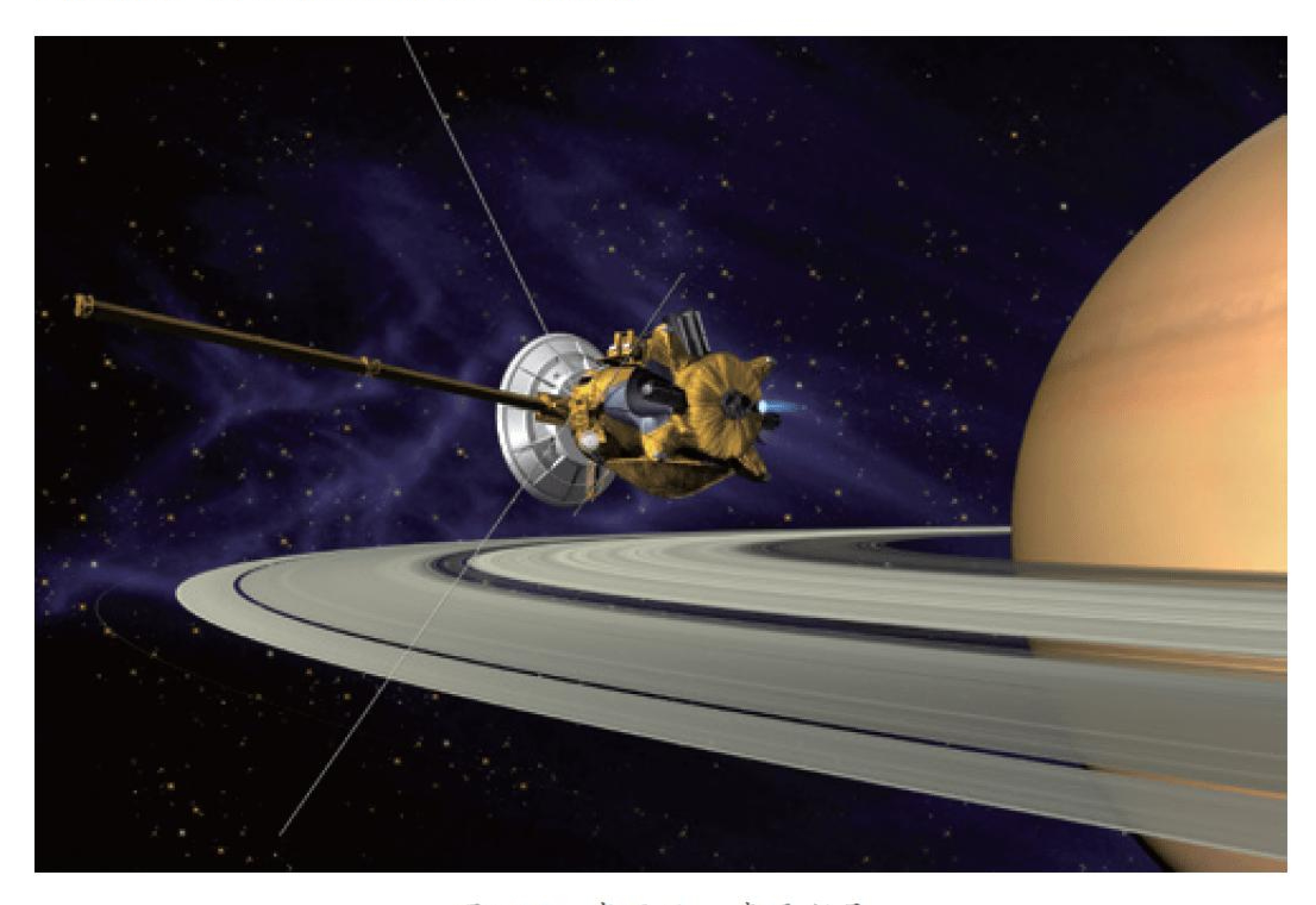


图 9.12 卡西尼－惠更斯号

卡西尼－惠更斯号是由 NASA 和欧洲航天局（European Space Agency, ESA）共同资助的。其中 NASA 造出了卡西尼号空间探测器，而 ESA 则造出了惠更斯号登陆车。卡西尼－惠更斯号于 1997 年 10 月 15 日发射。在经历了将近 7 年的漫长旅程之后，它于 2004 年 7 月 1 日进入了环绕土星飞行的轨道。2005 年，卡西尼－惠更斯号飞临土卫二的时候，发现了一件让人颇为惊奇的事情：与木卫二类似，土卫二内部同样有一个巨大的液态海洋。

我们在游览木卫二的时候已经讲过，利用伽利略号木星探测器，人们于 1995 年发现木星的磁场诱导出了木卫二的磁场，进而根据法拉第电磁感应规律推断出木卫二内部必须有一个能导电的液态海洋。相比之下，科学家们发现土卫二内部海洋的方法就直截了当很多了：2005 年，卡西尼－惠更斯号首次拍摄到土卫二南极地区的影像，并且发现此地区存在一大堆能喷射到几百千米高度的超

级喷泉。光谱分析表明，这些喷泉的主要成分是水蒸气和冰，同时也含有少量钠盐。据此人们推断出在土卫二的冰层之下，同样存在着一个液态盐水海洋（图 9.13）。

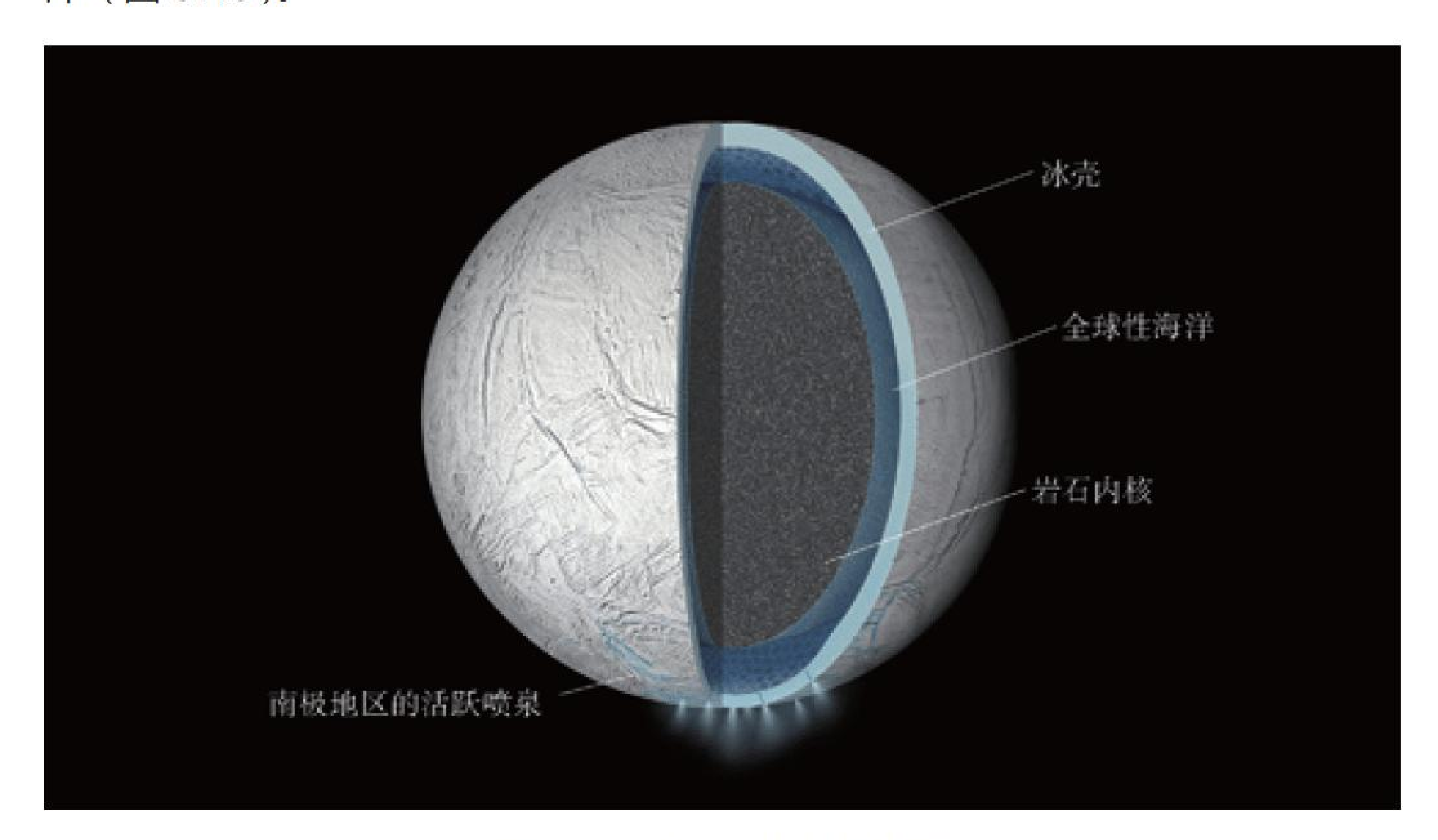


图 9.13 土卫二的内部结构

为什么土卫二内部会有一个液态海洋呢？其实很好解释。

我们在游览木卫二的时候说过，在木星和其他几颗伽利略卫星的潮汐力的作用下，木卫二的内部会因摩擦生热而产生巨大的热量，进而融化掉其内部的冰并形成太阳系最大的海洋。

同样的道理，土卫二也受到了土星和一些大型土星卫星的潮汐力；而由此产生的巨大热量也会融化掉土卫二内部的冰，从而形成卡西尼 - 惠更斯号所发现的那个液态海洋。

除此以外，这些因潮汐力而产生的巨大热量，也会造出土卫二上冰火山的爆发。

图 9.14 就展示了土卫二冰火山的爆发全过程。类似于地球上的海底火山爆发，土卫二内部积聚的巨大能量也会经常以火山爆发的形式释放出来。不过两者之间有一个很大的区别：地球上的海底火山爆发，喷出来的主要是岩浆；而土卫二上的火山爆发，喷出来的是含有少量钠盐的水。在巨大的压力下，这些盐水穿过约为 65 千米深的液态海洋和约为 5 千米深的固态冰盖，从而形成高达数百千米的超级喷泉。

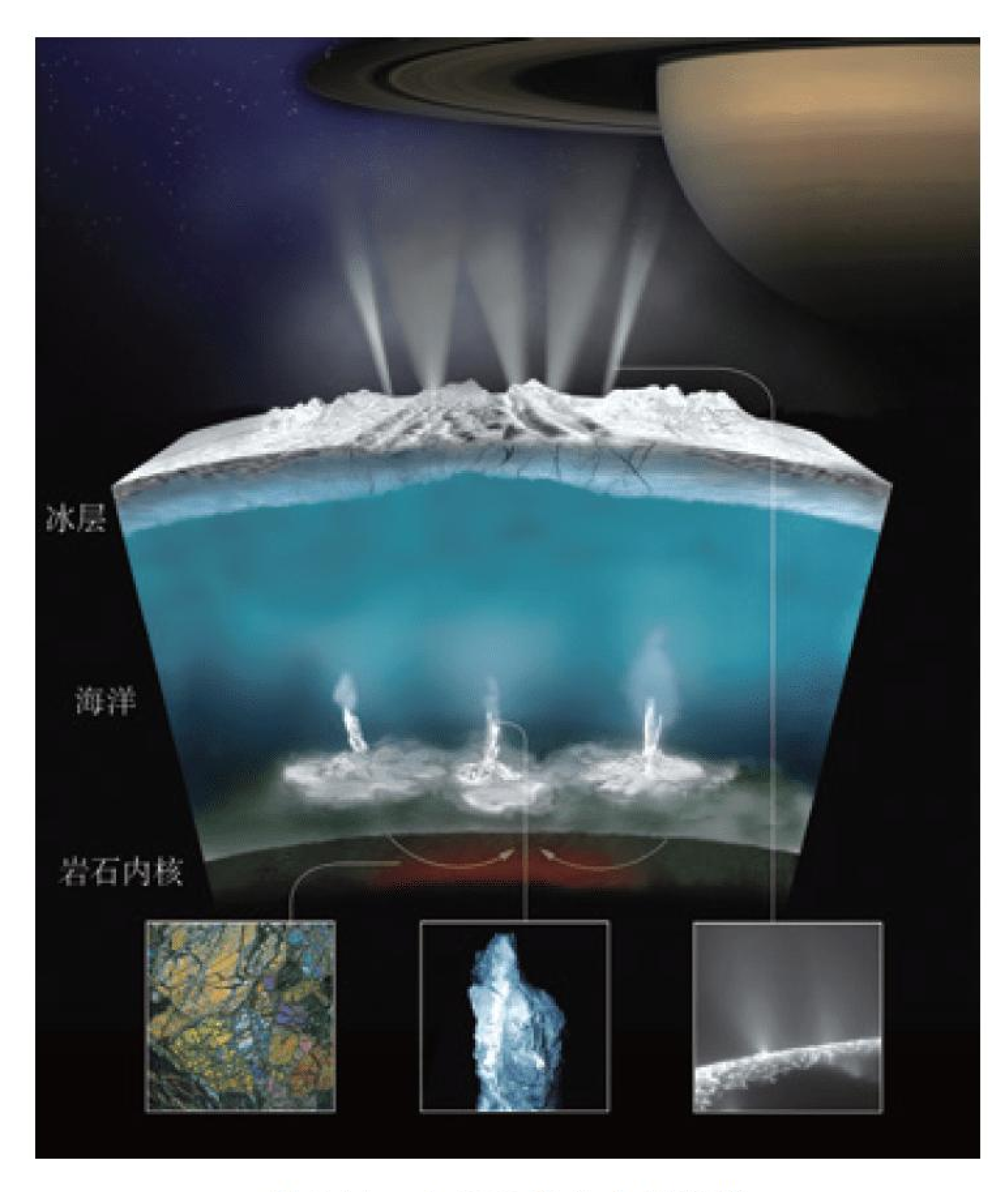


图 9.14　土卫二冰火山的爆发

前面说过，土卫二的直径也就 500 千米。而它喷出的超级喷泉，其高度竟然也能达到将近 500 千米。你可以想象，这是一个多么壮丽的景象。

不过，这并不是土卫二超级喷泉带给人类的全部惊喜。

2017 年 4 月 14 日，NASA 召开新闻发布会，向公众介绍当天发表在《自然》杂志上的一篇论文。这篇论文声称，土卫二已经具备维系生命生存的所有条件。这让土卫二一跃成为整个太阳系中除地球以外最有可能发现生命的天体。

这是怎么回事呢？让我们说得更详细一点。

前面说过，土卫二的南极地区有一大堆能喷射到几百千米高度的超级喷泉。2015 年，卡西尼号土星探测器从其中的一个喷泉中穿行而过，并且对此喷泉进行了取样。通过分析样品的化学成分，科学家们发现在土卫二的喷泉中除了水，还含有二氧化碳、甲烷和明显高于正常水平的氢气。因为这些喷泉源于土卫二的

内部海洋，所以其内部海洋里肯定也有这些化学物质。

这就很有意思了。这是由于人们在地球上已经发现，在液态水的环境下，一些微生物能将氢气和二氧化碳结合起来，生成甲烷并获得维持生存所需要的能量。事实上，这个化学反应在地球生命诞生之初起到了至关重要的作用。换句话说，如果土卫二的内部海洋中存在微生物，它们完全可以像诞生之初的地球微生物，靠这个生成甲烷的化学反应来维持自身的生存。当然，这也让土卫二一跃成为整个太阳系中最有可能发现地外生命的天体。

最后多说几句。在 2017 年 4 月 14 日的那场新闻发布会上，除了宣布土卫二已经具备维系生命生存的所有条件，NASA 还介绍了另外一项科研成果：在木卫二的南极地区，同样发现了高度达 200 多千米的水蒸气喷泉。这意味着，木卫二内部的那个全太阳系最大的海洋，很可能也像土卫二的内部海洋一样，拥有适宜生命生存的必要条件。由于有木卫二和土卫二的双保险，或许在不远的未来人们就能发现，在太阳系中，地球并不是生命唯一的绿洲。

我们来做个总结。2005 年，卡西尼 - 惠更斯号在飞临土卫二的时候，首次拍摄到土卫二南极地区的影像，并且发现此地区有一大堆能喷射到几百千米高度的超级喷泉。光谱分析表明，这些喷泉的主要成分是水蒸气和冰，同时也含有少量钠盐。据此，人们推断出在土卫二的冰层之下存在着一个液态盐水海洋。2015 年，卡西尼号从其中的一个喷泉中穿行而过，并对它进行了取样分析，发现此喷泉中除了水以外，还含有二氧化碳、甲烷和氢气。这说明，土卫二的内部海洋里也含有这些化学物质。人们在地球上已经发现，在液态水的环境下，一些微生物能将氢气和二氧化碳结合起来，生成甲烷并获得维持生存所需要的能量。因此，土卫二已经成为整个太阳系中除地球以外最有可能发现生命的天体。或许在不远的未来人们就能发现，在太阳系中，地球并不是生命唯一的绿洲。

我们已经游览了太阳系中最有可能找到地外生命的土卫二。下一节，让我们去探访另一颗充满神秘色彩的土星卫星。



9.3 泰坦的橙色大气层下到底隐藏着怎样的秘密？

离开了最有可能存在生命的土卫二，让我们前往另一个梦幻之地，那就是土卫六，别名泰坦（图 9.15）。

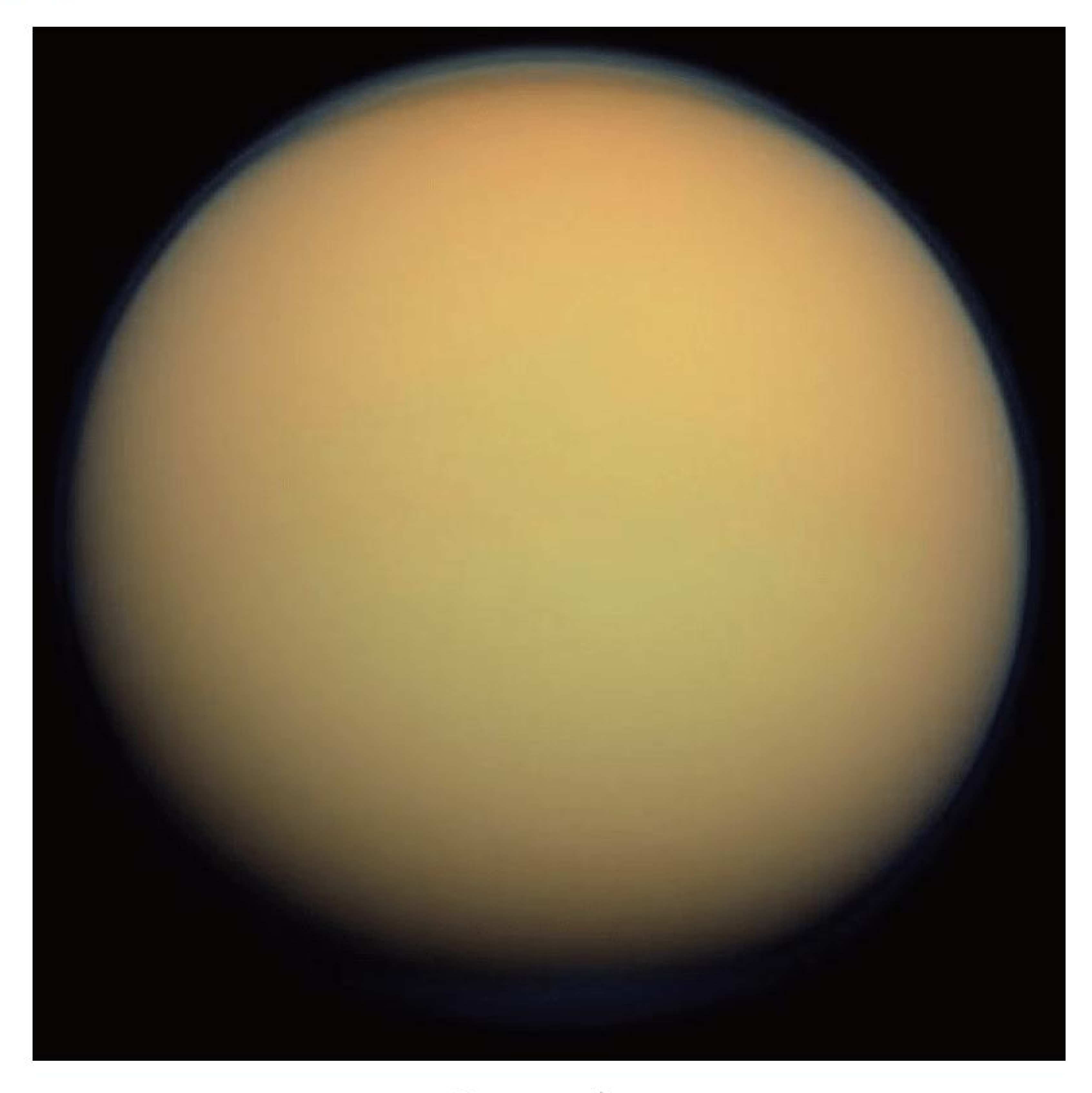


图 9.15 泰坦

泰坦是土星最大的卫星，同时也是太阳系第二大的卫星，仅次于木卫三。

很长一段时间，泰坦一直是太阳系中最有名的卫星。《复仇者联盟 3》中的超级大反派灭霸，其故乡就是泰坦。除此以外，人类航天史上最著名的“大旅行”计划，原本是要派两个探测器同时探测木星、土星、天王星和海王星。可到了土星以后，旅行者号 1 号却临时改变了计划，不去天王星和海王星了。为什么它要

改变航线呢？因为 NASA 的科学家们派它去探测泰坦了。

为什么泰坦会如此引人注目呢？因为它拥有一样太阳系其他卫星全都没有的东西，那就是浓密的大气层。

最早证实泰坦上存在大气的人是荷兰天文学家杰勒德·柯伊伯。1944 年，他发现泰坦的光谱中存在甲烷，进而推断出泰坦拥有一个富含甲烷的大气层。

此后 30 多年的时间里，人们对泰坦一直都没有什么特别重要的发现。直到 1979 年，先驱者 11 号才首次飞临土星系统，并且拍下了第一张泰坦的近距离照片。1980 年，旅行者 1 号专门飞到泰坦附近，并且收集了大量的关于泰坦大气层的信息（图 9.16）。

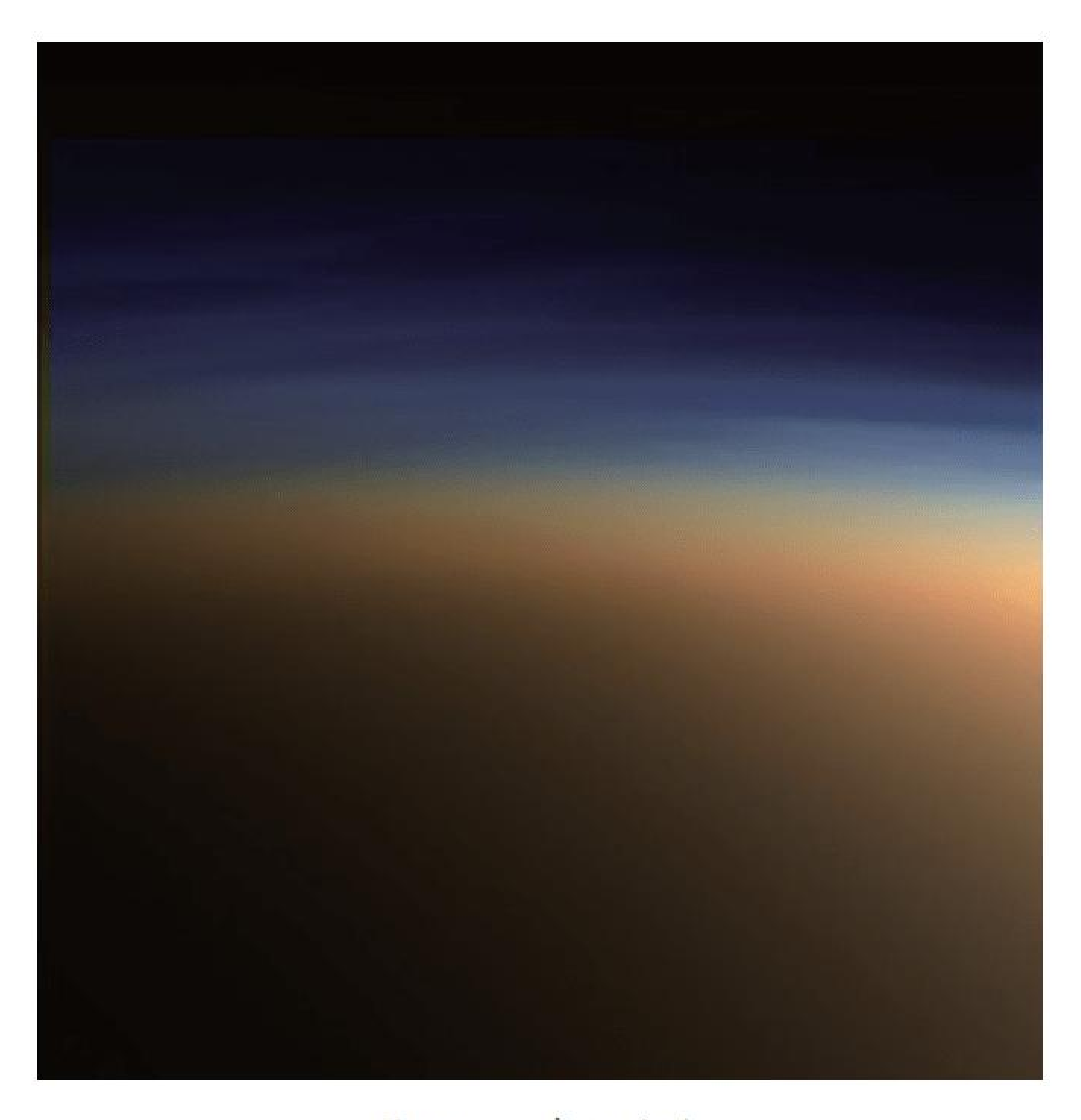


图 9.16　泰坦大气

基于这些观测，人们发现泰坦竟然拥有比地球更致密的大气层。换言之，尽管自身质量还不到地球的 1/4，泰坦大气层的总质量竟比地球大气层还大 19%。此外，研究表明泰坦大气层中 98.4% 的成分是氮气，另外还有 1.4% 的甲烷和 0.2% 的氢气。

不同于地球，泰坦本身并没有磁场。可能你会奇怪了："那泰坦的大气层为什么没有被太阳风剥离呢？"答案是受到了土星磁场的保护。泰坦与土星相距不远。

因此在绝大多数的时间里，它都处于土星磁场的范围之内。土星磁场起到了保护伞的作用，阻止了太阳风直接轰击泰坦大气层。不过有时候，泰坦也会跑到土星磁场之外。在这种情况下，泰坦大气中的甲烷就会和太阳风发生化学反应，而产生由一些碳氢化合物构成的橙色烟雾。这就是泰坦看起来是橙色的原因。

由于这种橙色烟雾，很长一段时间人们都无法看清泰坦的真面目，这也让它成了太阳系中最神秘的卫星。一直到 21 世纪，卡西尼－惠更斯号土星探测器才为我们揭开泰坦的神秘面纱。

前面说过，卡西尼号是 NASA 制造的空间探测器，而惠更斯号是 ESA 制造的登陆车。2004 年 7 月 1 日，卡西尼－惠更斯号进入土星轨道。2004 年 12 月 24 日，惠更斯号登陆车与卡西尼号探测器分离；经过 20 天的跋涉，它于 2005 年 1 月 14 日登陆泰坦，这也让泰坦变成了人造探测器登陆过的最遥远的天体。登陆后，惠更斯号坚持工作了一个半小时，直到能源耗尽。从它传回地球的几百张照片里，人们只能看到一个乱石嶙峋的荒原（图 9.17）。



图 9.17　惠更斯号传回的泰坦照片

相比之下，卡西尼号要给力很多。每次从泰坦上空飞过的时候，它都会用雷达对泰坦的表面地形进行测绘。雷达的工作原理很简单：它的发射器可以发出几乎不受大气层影响的无线电波，这些无线电波经过泰坦表面的反射，又会被它的接收器收到。通过向泰坦表面发射大量的无线电波，并且统计它们返回接收器的时间差，就可以测绘出泰坦的地形。由于在泰坦上空飞行的时间有限，一次只能测绘出泰坦的一小片区域。因此，泰坦的地图需要一小片一小片地拼起来。

2006 年，卡西尼号取得了重大的突破：它在泰坦表面发现了一个面积达到 40 万平方千米的海洋！人们根据北欧神话中的深海怪物，把它命名为克拉肯海。不久后，人们又在泰坦表面发现了另外两个小一点的海洋，分别是面积为 12.5 万平方千米的丽姬娅海和面积为 4.2 万平方千米的蓬加海。这样一来，泰坦就成

了整个太阳系中，除地球以外唯一一个拥有地表液态海洋的天体。

图 9.18 就展示了泰坦的三大海洋。图中左下方的是面积最大的克拉肯海。克拉肯海右边的是面积次之的丽姬娅海。而两者之上的则是面积最小的蓬加海。

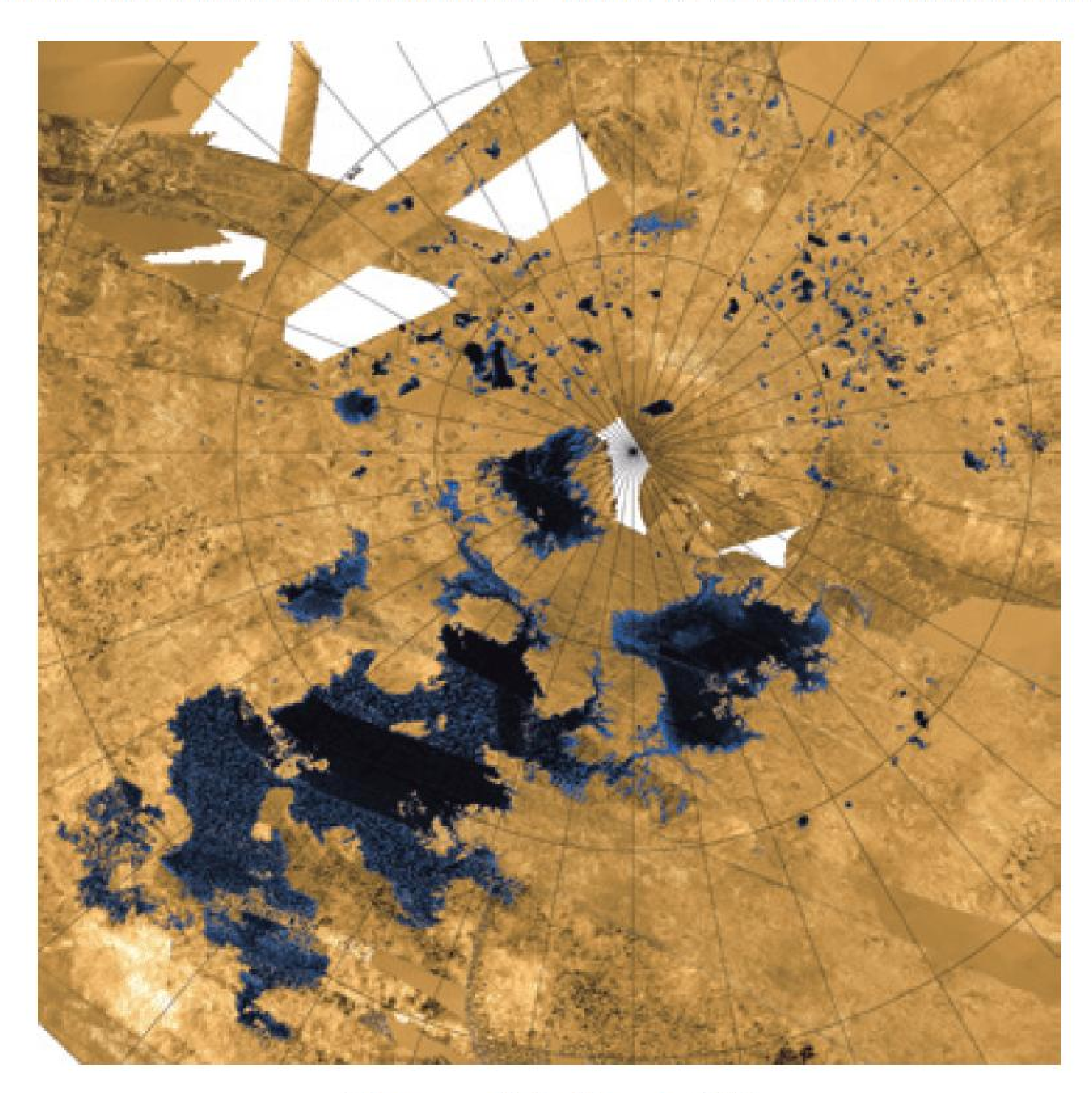


图 9.18 泰坦的三大海洋

说件有趣的事。在克拉肯海的中间，有一条非常狭窄的海峡几乎把它一分为二，这就是“克拉肯咽喉”。由于土星的潮汐力，克拉肯海也会有涨潮和落潮；换句话说，海水会从克拉肯咽喉的一端流向另一端。这种情况非常像苏格兰的科里弗雷肯海峡。在那里，海水通过狭窄海峡的时候，经常会形成一些特别大型的海底旋涡。这意味着，在泰坦的克拉肯咽喉处，很可能也有一些非常巨大的海底旋涡（图 9.19）。

研究表明，与地球海洋不同的是，泰坦海洋的主要成分是液态甲烷。由于液态甲烷特别容易蒸发，所以要想维持泰坦的地貌，就必须持续不断地给这三个海洋补充新的甲烷。据此人们推断，在泰坦地表之下，应该还有一个规模更大的液态甲烷的海洋（图 9.20）。



图 9.19　海底漩涡



图 9.20　泰坦海洋的假想图

最后，让我们来聊聊在泰坦上是否有可能存在生命。

前面说过，泰坦是太阳系中唯一拥有浓密大气层的卫星；此外，它也是除地球以外唯一拥有地表液态海洋的天体。这意味着，泰坦的环境很类似于生命诞生初期的地球。通过在实验室里模拟泰坦的大气和海洋，科学家们已经发现泰坦可

以自发合成一些复杂的有机物质。此外，太阳系中大大小小的彗星也有可能把氨基酸或蛋白质带到泰坦上。这意味着，泰坦有成为生命栖身之所的潜力。

不过与得天独厚的地球相比，泰坦还是有两个很大的劣势。

首先，泰坦表面特别冷，平均温度大概只有零下 180℃。温度低说明，泰坦本身相当缺乏能量，而能量又是生命活动必不可少的东西。这意味着，即使泰坦上真的存在生命，也只能是一些最简单的微生物，而不可能是一些比较复杂的大型生物。

其次，泰坦的大海里只有液态甲烷，没有液态水。作为生命活动的舞台，液态甲烷比液态水可差远了。不过 2005 年，美国天体生物学家大卫·格林斯彭（图 9.21）提出了一个非常大胆的猜想：在泰坦表面的液态海洋里，有可能存在依靠甲烷为生的生物。这些生物的细胞液中没有液态水，只有液态甲烷。此外，地球生物总是吸入氧气，产生葡萄糖来储存能量，并且呼出二氧化碳。而这些泰坦生物则吸入氢气，产生乙炔来储存能量，并且呼出甲烷。格林斯彭还预言，如果真有这种靠甲烷生存的生物，它们生活区域的氢气和乙炔的含量就会明显偏高。不过到目前为止，并没有发现这种生物存在的迹象。


图 9.21　大卫·格林斯彭

我们来做个总结。灭霸的故乡泰坦，一直是太阳系中最有名的卫星之一。这是因为它是太阳系中唯一一个拥有浓密大气层的卫星。由于大气层的存在，很长一段时间人们都无法看清泰坦的真面目，这也让它成为太阳系中最神秘的卫星。一直到 2006 年，卡西尼号空间探测器才利用雷达技术绘制出了泰坦表面的地图。结果发现，泰坦的表面竟然有三个液态甲烷的海洋，这也让泰坦成为整个太阳系中除地球以外唯一拥有地表液态海洋的天体。三个海洋中面积最大的克拉肯海，其正中的位置是一个名叫“克拉肯咽喉”的狭窄海峡；研究表明，这个地方很可能有一些巨大的海底漩涡。此外，格林斯彭于 2005 年指出在泰坦表面的液态海洋里，有可能存在依靠甲烷为生的生物。不过到目前为止，并没有发现这种生物存在的迹象。



10

天王星

10.1 天王星是怎么被发现的？

离开了土星，让我们前往这次太阳系之旅的第十站：天王星（图 10.1）。

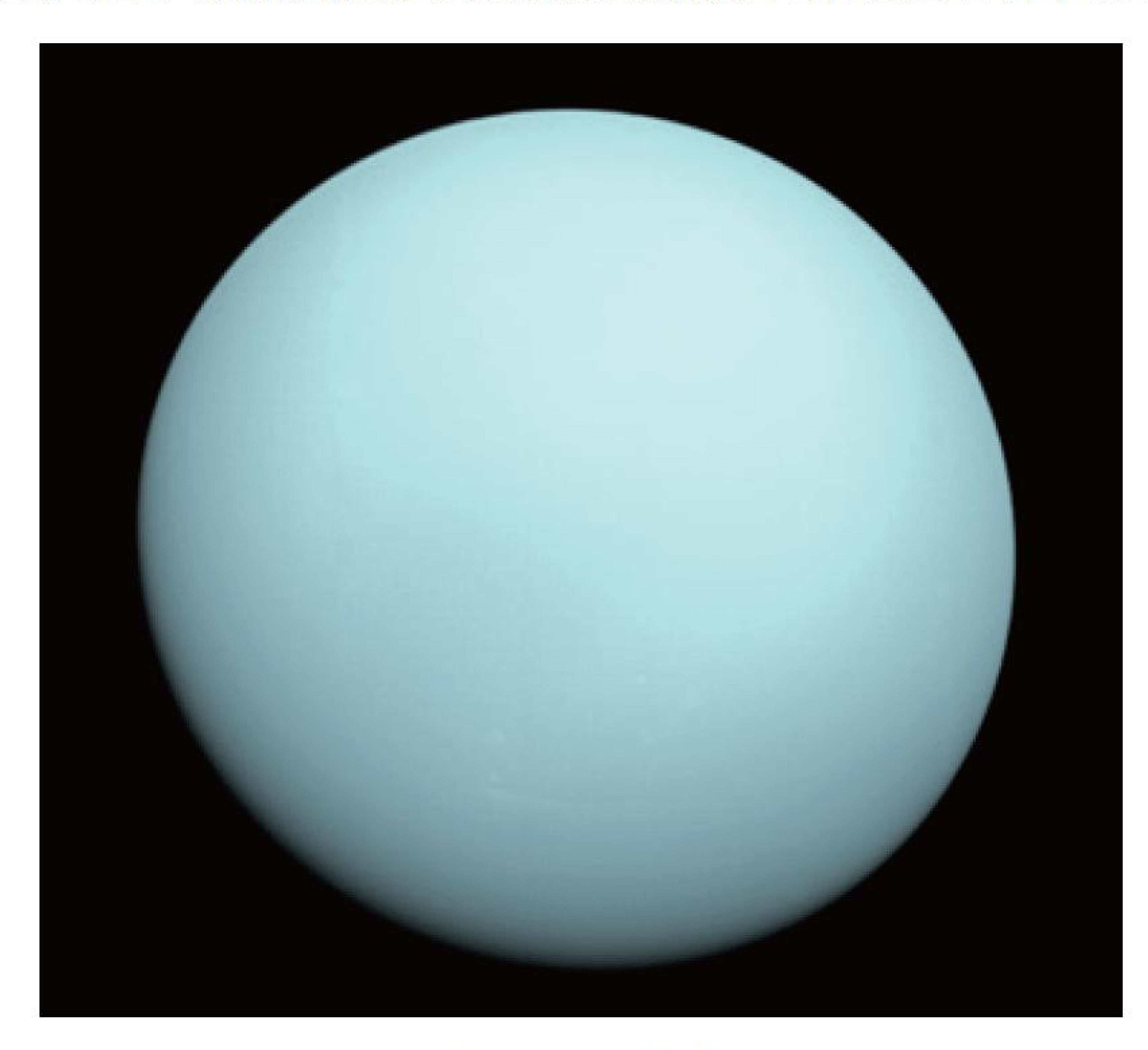


图 10.1　天王星

质量：8.681×10^{25} 千克（地球质量的 14.5 倍）
体积：6.833×10^{22} 立方米（地球体积的 63.1 倍）
与太阳的平均距离：2.875×10^{9} 千米（日地距离的 19.2 倍）

前面已经多次提到托勒密的地心说和哥白尼的日心说。在这两种宇宙学理论中，土星之外都是镶满恒星的天球。换句话说，很长一段时间，人类都相信太阳系内总共只有 6 颗行星。

但事实上，人类其实早就看到天王星了。举几个例子，公元前 128 年，古希

腊天文学家喜帕恰斯就标记出了天王星的方位。两百多年后，大天文学家托勒密也把它编入了自己的星表。17 世纪 90 年代，英国首任皇家天文学家约翰·弗拉姆斯蒂德至少看到它 6 次。但由于观测能力有限，这些人全都把它当成了一颗恒星。正因为如此，这群倒霉蛋就与“发现太阳系第 7 颗行星”的荣誉失之交臂。



图 10.2 威廉·赫歇尔

到了 18 世纪 80 年代，才终于有人把发现第 7 颗行星的荣誉收入囊中。此人就是英国大天文学家威廉·赫歇尔（图 10.2）。

威廉·赫歇尔原本是一个纯粹得不能再纯粹的音乐家。1738 年，他出生在德国汉诺威的一个音乐世家，他爸爸是汉诺威军乐团的双簧管演奏家。在这样的环境里长大，威廉·赫歇尔自然而然地选择了音乐作为自己的职业；16 岁那年，他也加入了汉诺威军乐团，成了一名双簧管演奏家。但两年后，德国与法国爆发了一场战争，而汉诺威的军队也被法国人打败。为了保命，威廉·赫歇尔就做了一名逃兵，跑到了英国去避难。

到英国后，威廉·赫歇尔还是以音乐为生。1761 年，他到了纽卡斯尔，成为一支管弦乐团的首席小提琴手。几年后，他又移居利兹，成为一个教堂的管风琴手。后来，他的妹妹卡罗琳·赫歇尔也跑到了英国来投靠她的音乐家哥哥。在演奏之余，威廉·赫歇尔也创作了大量的音乐作品，包括 24 部交响曲和大量的协奏曲。

但这位纯粹的音乐家，却在业余时间自学了一门非常特殊的手艺，那就是磨制望远镜的镜片。事实上，他是那个时代最厉害的制造望远镜的大师。威廉·赫歇尔一生中总共制造了 400 多台望远镜，其中最有名的就是图 10.3 所示的这台 1.26 米口径的大型光学望远镜。很长一段时间，它都是世界上最大的望远镜；后来，它甚至成为英国皇家天文学会的官方“Logo”。

靠着制造望远镜的出众手艺，威廉·赫歇尔很快就在天文学界声名鹊起。18 世纪 70 年代到 80 年代，他做出了一系列的天文发现，其中最重要的就是于 1781 年发现了天王星。就像科学史上的很多重要发现一样，天王星的发现本身也是一个无心插柳柳成荫的故事。

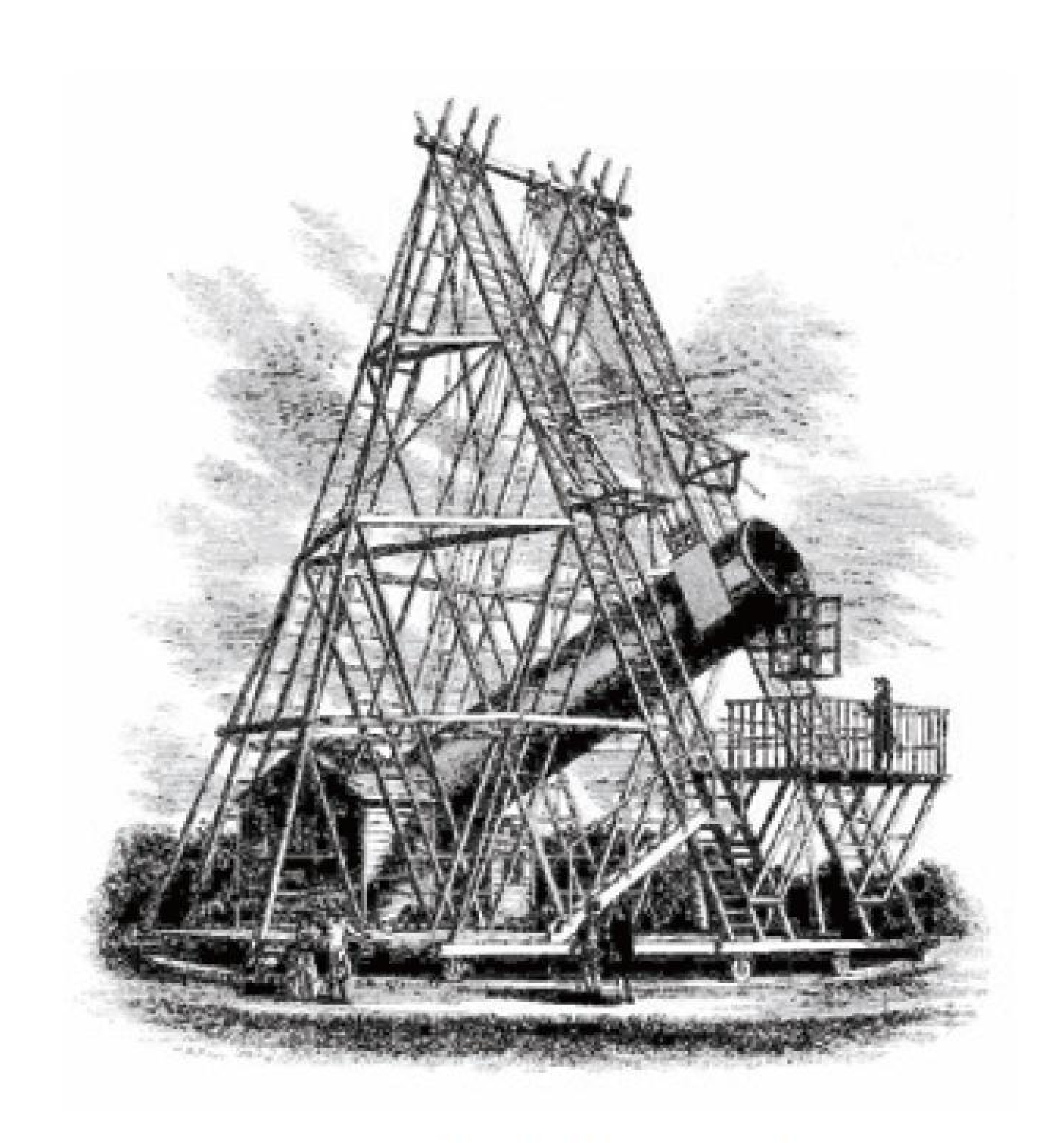


图 10.3　赫歇尔的大型望远镜

从 1773 年开始，威廉·赫歇尔就玩起了跨界。白天，他在教堂里演奏管风琴；晚上，他在自家后院里用图 10.4 所示的自制望远镜仰望星空。赫歇尔对寻找双星特别感兴趣。所谓的双星，就是两颗相距较近并且彼此绕转的恒星。他曾立下宏愿，要把天上所有的双星都找出来。为此，他开始一点一点地搜寻北半球的天空。而这个搜寻双星的过程有一个副产品，那就是能时不时地发现新的彗星。



图 10.4　赫歇尔的小型望远镜

1781 年 3 月 13 日，威廉 · 赫歇尔在金牛座的区域又发现了一颗新“彗星”，然后把这个发现报告给了英国皇家学会。

但很快地，人们就发现了这个“彗星”的不同寻常之处。众所周知，彗星是一个脏兮兮的大冰球；当它靠近太阳的时候，太阳风能让彗星上的冰块升华，从而形成一条长长

的彗尾。但威廉·赫歇尔发现的这颗“彗星”，压根就没有任何彗尾。

不久后，拥有芬兰和瑞典双重国籍的天文学家安德斯·莱克塞尔利用有限的观测数据，算出了这个天体的运动轨道。结果表明，它的运动轨道并不是彗星的那种狭长椭圆轨道，而是行星的那种相当接近于圆形的轨道；此外，莱克塞尔还算出这个天体的运动轨道，竟然处于土星的运动轨道之外。这意味着，威廉·赫歇尔发现的，其实是一颗位于土星之外的新行星。

这样一来，威廉·赫歇尔的这个无心插柳的发现，立刻变成了轰动整个天文学界的特大新闻。自古以来，人类一直认为太阳周围总共有 6 颗行星，而土星就是太阳系的边缘。但赫歇尔的发现让人类认识到，原来在土星之外还有一个更为辽阔的世界。

威廉·赫歇尔把他发现的这颗新行星命名为“乔治之星”，来向出身于汉诺威王朝的英王乔治三世示好。乔治三世果然龙颜大悦，不但赦免了威廉·赫歇尔当年当逃兵的罪过，还把他聘为了自己的御用天文学家。

从那以后，威廉·赫歇尔就脱离了音乐界，成为一名全职的天文学家。1821 年，他当选为英国皇家天文学会的首任会长。除了他本人，他的妹妹卡罗琳·赫歇尔和儿子约翰·赫歇尔，后来也都成为赫赫有名的天文学家。这也让赫歇尔家族变成了天文学史上最传奇的家族之一。

最后再多说几句。由于反感威廉·赫歇尔大拍马屁的行为，“乔治之星”这个名字受到了欧洲大陆的抵制。后来整个天文学界普遍认可了德国天文学家约翰·伯德起的名字：乌拉诺斯。这是希腊神话中的天空之神，也是第一代的神王的名字。在中国，它被翻译成了天王星。

我们来做个总结。威廉·赫歇尔原本是一个非常纯粹的音乐家，因为当了逃兵才从德国逃难到英国。但他很善于跨界，在英国自学了一门磨制望远镜镜片的独特手艺，并且很快成了那个时代最厉害的制造望远镜的大师。从 1773 年开始，他开始利用业余时间来研究天文学。1781 年 3 月 13 日，他在金牛座的区域发现了一颗新的“彗星”。不久之后，莱克塞尔通过计算这个天体的运动轨道，证明了它其实是一颗位于土星之外的新行星。此发现立刻轰动全世界。它让人类认识到，原来在土星之外还有一个更为辽阔的世界。而这颗新行星，后来就被命名为天王星。

前面已经介绍了人类发现天王星的历史。下一节，让我们去看一看天王星的诡异磁场。



10.2 天王星为何会有诡异的磁场？

让我先来简单地介绍一下天王星。

尽管表层都是气态，天王星与我们前面游览过的木星和土星还是有显著的不同。木星和土星基本由氢和氦这两种元素构成。而天王星除了有氢和氦，还包含大量更重的元素，例如碳、氮、氧、硫。这些元素合成的很多化合物都以固态形式存在的。所以天文学家就给天王星设立了一个新的分类：冰巨星。

天王星是太阳系中体积第三大的行星，仅次于木星和土星；但由于它的密度很小，只比水大 27%，所以它的质量略小于海王星，只能排到第四位。此外，天王星与太阳的平均距离约为日地距离的 20 倍，大概需要 84 个地球年才能绕太阳转上一圈。

在天王星的诸多特征中，最有趣的是它的自转。与其他所有行星都截然不同的是，天王星自转轴的方向几乎与它的公转轨道平面平行。从图 10.5 可以看出，天王星一直都在自己的公转轨道上躺着打滚。可能有读者会奇怪了，为什么天王星会躺着打滚呢？目前最流行的理论认为，它是被一颗巨大的小行星或彗星给撞歪了。

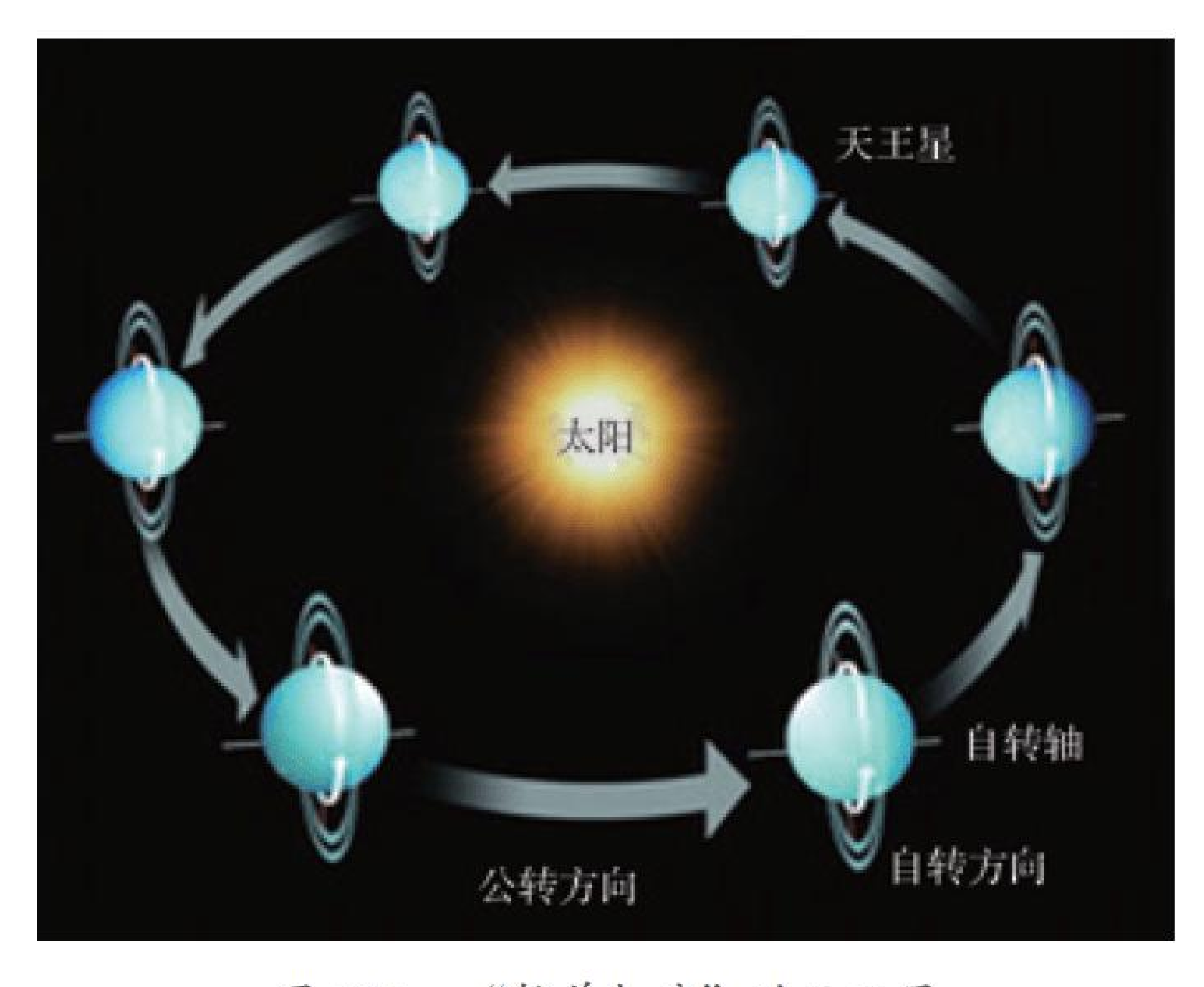


图 10.5 “躺着打滚”的天王星

之前游览的那 6 颗行星都曾有不少空间探测器造访。但迄今为止，只有一个空间探测器造访过天王星，那就是好几十年前发射的旅行者 2 号。1986 年 1 月 24 日，旅行者 2 号从与天王星大气层相距 81 500 千米的地方飞掠而过。这次短暂的相遇，让旅行者 2 号发现了一个让科学家们大跌眼镜的现象，那就是天王星的诡异磁场。

下面，我就来讲讲天王星的磁场到底诡异在哪里。为了便于理解，让我先从大家比较熟悉的地球磁场说起。

众所周知，地球上有南北两极，其中南极点在南极洲，而北极点在北冰洋。这种两极是由地球的自转决定的，称为地理两极；也就是说，地球的自转轴，就是地理南极点和地理北极点的连线。除了地理两极以外，还有一种由地球磁场决定的两极，称为地磁两极。所谓的地磁两极，就是地球磁轴与地球表面相交的两个磁场强度最大的地方。需要强调的是，地球的地理两极和地磁两极并不重合。换言之，地球的自转轴和它的磁轴之间存在着大概 11 度的夹角。

不光是地球，我们前面游览过的其他行星，无论其磁场是大是小，它们的自转轴和磁轴之间的夹角，也都是十几度。

但天王星的情况却大为不同。正如图 10.6 所示，它的自转轴和磁轴之间的夹角，居然达到了惊人的 59 度。另一个诡异之处是，天王星的自转轴和磁轴的交点，并非位于天王星的正中心，与正中心的距离约为天王星半径的 1/3。

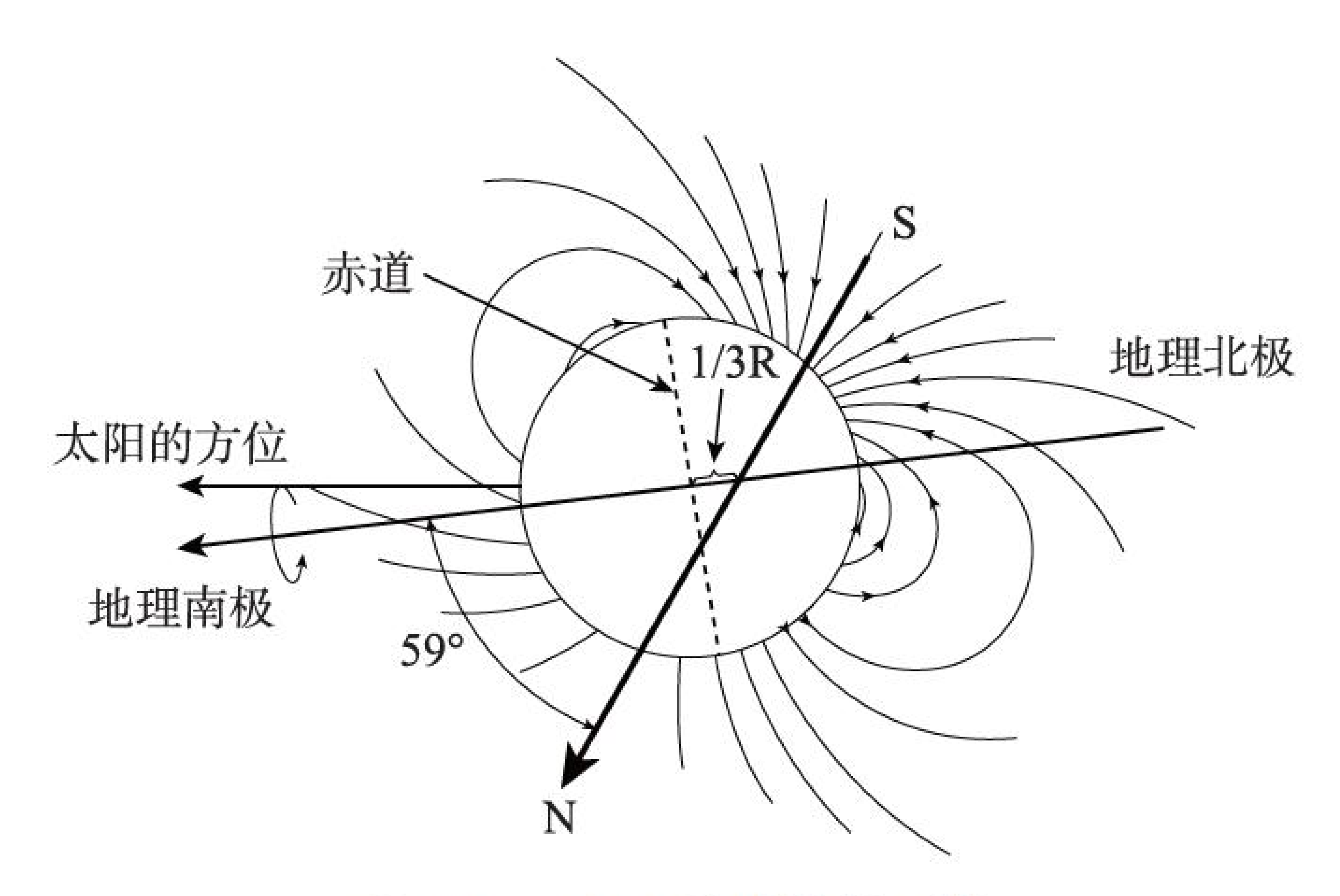
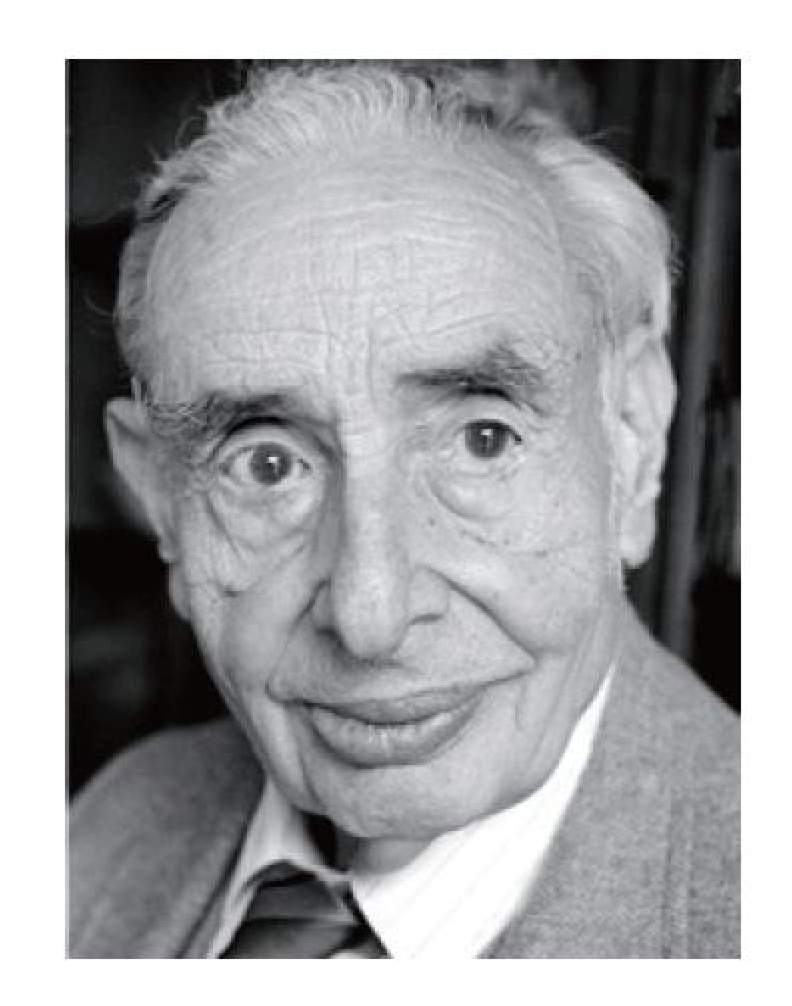


图 10.6　天王星的诡异磁场

那为何天王星会有如此诡异的磁场呢？为了回答这个问题，我们必须先讲讲


图 10.7 沃尔特·埃尔泽塞尔

行星的磁场到底是如何产生的。

而要想解释行星如何产生磁场，就不得不提到一个特别倒霉的科学家。此人就是德裔美籍物理学家沃尔特·埃尔泽塞尔（图 10.7）。

埃尔泽塞尔生于 1904 年。对物理学家而言，这是一个非常好的年份。事实上，量子力学的黄金一代就出生在 20 世纪的前十年。举几个例子吧。泡利生于 1900 年，费米生于 1901 年，海森堡生于 1901 年，狄拉克生于 1902 年，贝特生于 1906 年，而朗道生于 1908 年。这些人全都赶上了 20 世纪 20 年代的那场量子力学革命，并且获得了诺贝尔物理学奖。所以，埃尔泽塞尔赶上了天时。

20 世纪 20 年代，埃尔泽塞尔在哥廷根大学攻读博士学位，师从著名物理学家、1954 年诺贝尔物理学奖得主马克斯·波恩。事实上，哥廷根大学是量子力学革命的一个重镇：海森堡就是在这里创立了矩阵力学，波恩也是在这里提出了概率波。因此，埃尔泽塞尔也拥有了地利。

尽管坐拥天时地利，但由于缺乏人和，埃尔泽塞尔很悲剧地两次与诺贝尔物理学奖失之交臂。

第一次悲剧发生在埃尔泽塞尔攻读博士学位期间。当时，德布罗意刚刚提出波粒二象性的概念；它说的是，世界上所有的微观粒子都像光一样，同时具有粒子和波的两重属性。埃尔泽塞尔很喜欢德布罗意的想法，并且想出了一个很精妙的实验方案来测量电子的波动性。按理说，他只要抓紧时间把这个实验做出来就万事大吉了。但不久后，他的导师波恩去英国开会，竟然大嘴一张把埃尔泽塞尔的实验构想给说了出去。受此启发，美国物理学家克林顿·戴维森和英国物理学家乔治·汤姆森很快就证明了电子会在晶格中发生衍射，因而具有波动的性质。这两人也因此获得了 1937 年的诺贝尔物理学奖。至于最早提出实验构想的埃尔泽塞尔，则因为没及时做出实验而未能获奖。

第二次悲剧发生在 1935 年。那时，埃尔泽塞尔正在研究原子核的内部结构，并且取得了很大的进展，推导出了一个非常关键的公式。但不幸的是，为了躲避

希特勒的巨大阴影，埃尔泽塞尔一心想要移民美国，所以就没有时间和精力来继续推进原子核结构的研究。不久之后，德国物理学奖汉斯·詹森和玛丽亚·梅耶基于埃尔泽塞尔的前期工作，提出了能很好描述原子核结构的核壳层模型，从而与美国物理学家尤金·维格纳一起分享了 1963 年的诺贝尔物理学奖。当然，当年急着移民的埃尔泽塞尔再一次与诺贝尔奖失之交臂。

到了美国以后，埃尔泽塞尔开始尝试转型，研究一些理论物理之外的领域。身为量子力学的黄金一代，这颇有点杀不动牛，只好改行杀鸡的味道。在 1946 年，埃尔泽塞尔终于做出了能青史留名的工作：他提出了一个理论，成功地解释了行星磁场的起源。这就是著名的“发电机理论”。

为了解释这个理论，让我先从大家相对比较熟悉的发电机说起。

发电机无疑是人类历史上最伟大的发明之一。它的工作原理很简单，就是我们前面讲过的法拉第电磁感应定律。这个定律可以用 8 个字来概括：动电生磁，动磁生电。

我们还是看图说话吧。图 10.8 就是发电机的工作原理图。发电的具体过程如下：首先，通过 E 和 F 两个接口为位于正中间的线圈（称为转子）供电，则运动的电流会让转子产生感应磁场。接下来，借助其他形式的能量（如水能、风能、化学能）让转子不断旋转，则运动的磁场会在与 A、B、C 三个接口相连的那个线圈（称为定子）上产生感应电流。这个感应电流要比为转子供电的电流大很多倍。换言之，发电机的本质是利用法拉第电磁感应定律，实现电流的放大。

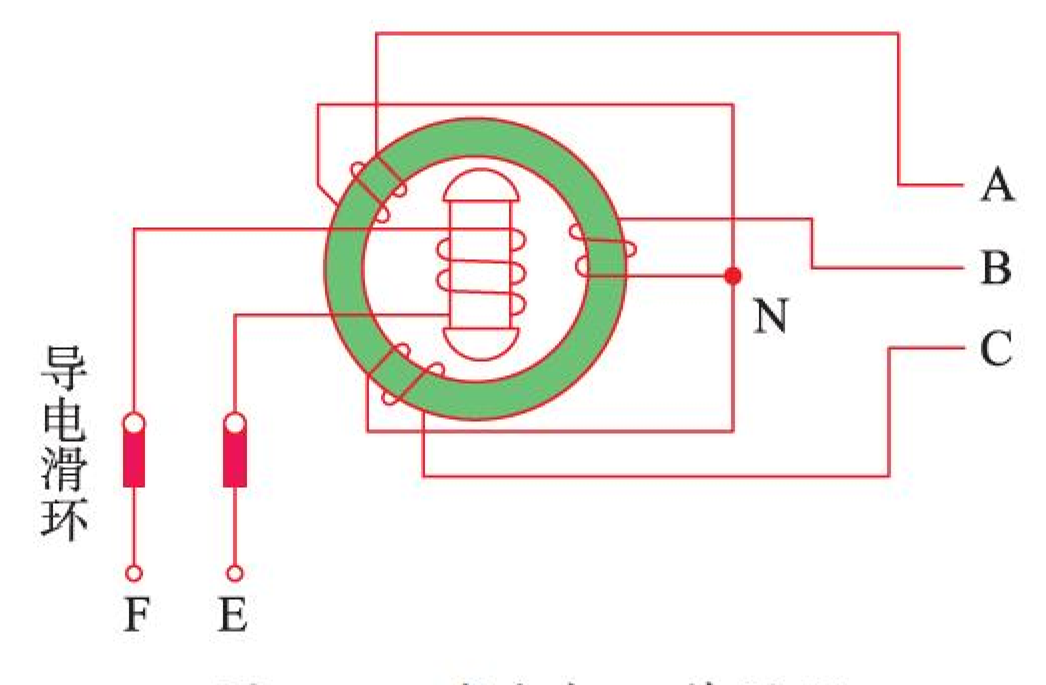


图 10.8　发电机工作原理

明白了发电机的工作原理，埃尔泽塞尔的“发电机理论”就不难理解了。本质上，它是利用法拉第电磁感应定律，来实现磁场的放大。

“发电机理论”认为，一个天体要想产生强大的磁场，必须同时满足以下三

个条件：第一，它要不断地自转；第二，它内部要有能够导电的液体；第三，它要有内部能量源来驱动液体的对流运动。

很明显，这三个条件，地球全都能完美地满足。众所周知，地球在以 24 小时一圈的速度自转，这就满足了条件一。此外，在地球中心有一个半径约为 3400 千米的铁合金区域，其内层固态而外层液态；外层的液态铁可以导电，这就满足了条件二。最后，地球内核的温度约为 6000℃，而铁核边缘的温度只剩 3500℃，这个温度就驱动了液态铁的对流，因而满足了条件三。

满足这三个条件以后，地球就可以产生强大的磁场。图 10.9 就是产生地球磁场的原理图。如果地球内部一开始就有一个微弱的“种子”磁场，它就会在地球自转的带动下产生感应电场。这个感应电场会由于液态铁的对流运动而产生感应电流（即图中蓝色的螺旋线），进而激发出比“种子”磁场大很多倍的新磁场。通过法拉第电磁感应效应来放大“种子”磁场，这就是地球磁场的起源。

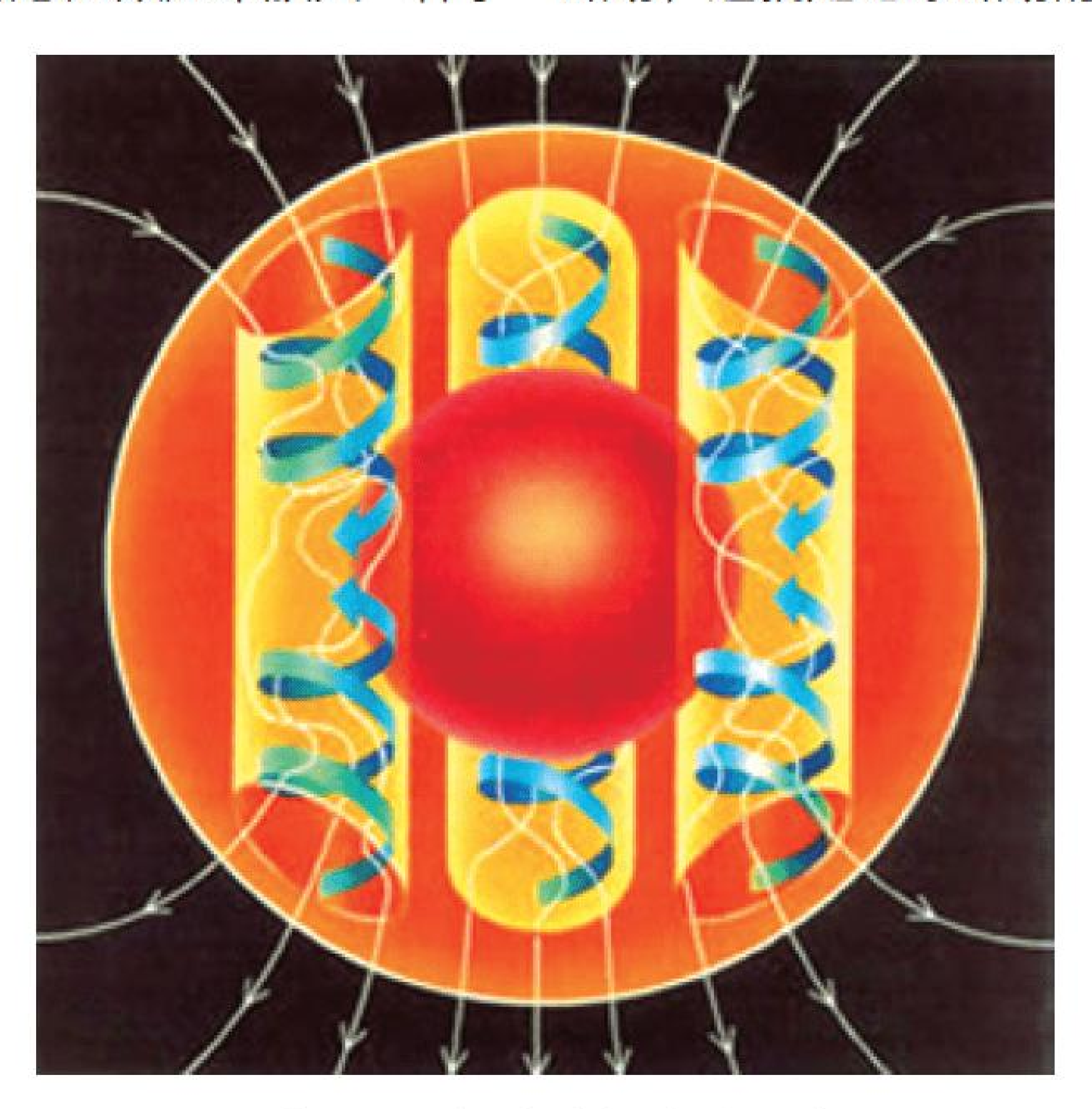


图 10.9　行星磁场的原理图

知道了“发电机理论”以后，现在我们可以来聊聊天王星的诡异磁场了。前面说过，天王星的磁场有两大诡异之处：一是自转轴和磁轴间的夹角高达 59 度；二是磁轴和自转轴的交点并不在天王星的中心。

天王星能产生磁场，说明它也满足“发电机理论”要求的那三个条件。但为

什么天王星会有如此诡异的磁场呢？唯一的可能是，天王星的内部导电液体的分布，与地球存在很大的差异。地球内部液态铁的分布是均匀、球对称的；正因为如此，地球自转轴和磁轴的方向才会相差不大，而且两者的交点也会位于地球的中心。而对于天王星而言，其内部导电液体的分布肯定是不均匀、非对称的；只有这样，天王星自转轴和磁轴的方向才会出现很大的差异，且两者的交点才会显著偏离天王星的中心。

我们来做个总结。1986 年，旅行者 2 号探测器发现天王星拥有自己的磁场。天王星之所以会有磁场，是因为它满足了埃尔泽塞尔“发电机理论”所要求的三个条件：不断自转、有内部导电液体和导电液体处于流动状态。这样一来，天王星就可以通过电磁感应效应来放大“种子”磁场，进而形成今天所看到的磁场。与此同时，天王星的磁场又特别诡异：自转轴和磁轴之间的夹角居然能达到 59 度，而且两者的交点也显著偏离天王星的中心。这说明天王星内部导电液体的分布肯定是不均匀、非对称的。

这一路走来，我们已经见识过不少太阳系中的奇观，比如最高的山、最深的海、最大的风暴和最壮观的喷泉。下一节，我要带你去游览另一个堪称太阳系之最的景点，那就是太阳系最高的悬崖。

10.3 在太阳系最高的悬崖上蹦极是一种什么体验?

就目前所知，天王星总共有 27 颗卫星。其中有 5 颗卫星拥有足够大的质量，从而让它们能够保持球形。在这 5 颗大卫星中，块头最小同时也最靠近天王星的是美国天文学家杰拉德·柯伊伯在 1948 年发现的天卫五。在西方，天卫五也被称为米兰达；此名字源于英国大文豪莎士比亚写的《暴风雨》中的一个角色。很长一段时间，天卫五一直都很不起眼。直到 1986 年，旅行者 2 号探测器在考察天王星的时候顺路从天卫五的旁边飞过，这才让这颗奇特的卫星受到人们的瞩目。

图 10.10 就是旅行者 2 号拍到的天卫五的图像。它的密度很小，只比水大 20%。进一步研究表明，天卫五大概有 60% 的成分都是冰。换句话说，天卫五是一个被冰统治的世界。

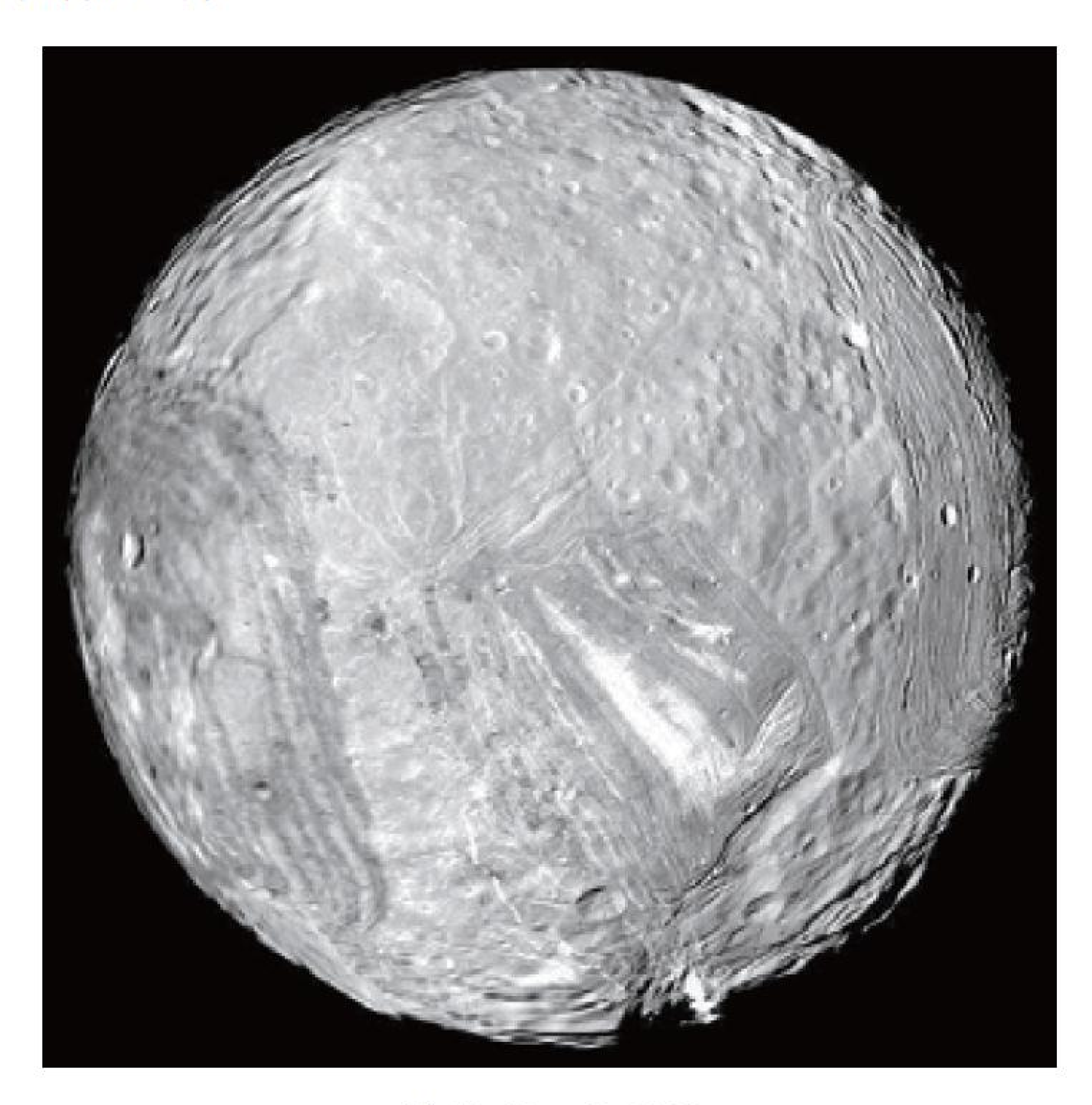


图 10.10　天卫五

如果要用一个词来描述天卫五的地形地貌特征，那肯定非“支离破碎”莫属。天卫五的表面残破不堪，各种平原、山脉和峡谷，全都错综复杂地混合在了一起。换句话说，天卫五不像地球，没有严格意义上的地形地貌的概念，因为各种地形地貌全都被炖成了一锅大杂烩。

如果有朝一日，人类能移民整个太阳系，并把天卫五的地形地貌列为地理高考的考试范围，那一定会很刺激。

为什么天卫五的地形地貌会如此支离破碎？答案还是我们之前反复提及的潮汐力。天王星及其主要卫星的潮汐力，让天卫五内部因摩擦而生热。这些能量频繁地以地震或火山爆发的方式冲破表面冰层，然后就把天卫五变成了现在这个杂乱无章的样子。

但在这个杂乱无章的冰封世界里，旅行者 2 号还是发现了一个不同寻常的事物。那就是我们前面提到的太阳系最高的悬崖。

为了便于对比，我们先来看看地球上最高的悬崖（图 10.11）。它位于地球第九高峰（南迦・帕尔巴特峰）的南面，被称为鲁帕尔岩壁。它的垂直高度约为 4600 米，是世界第一高楼（迪拜的哈利法塔）的 5.5 倍（图 10.12）。

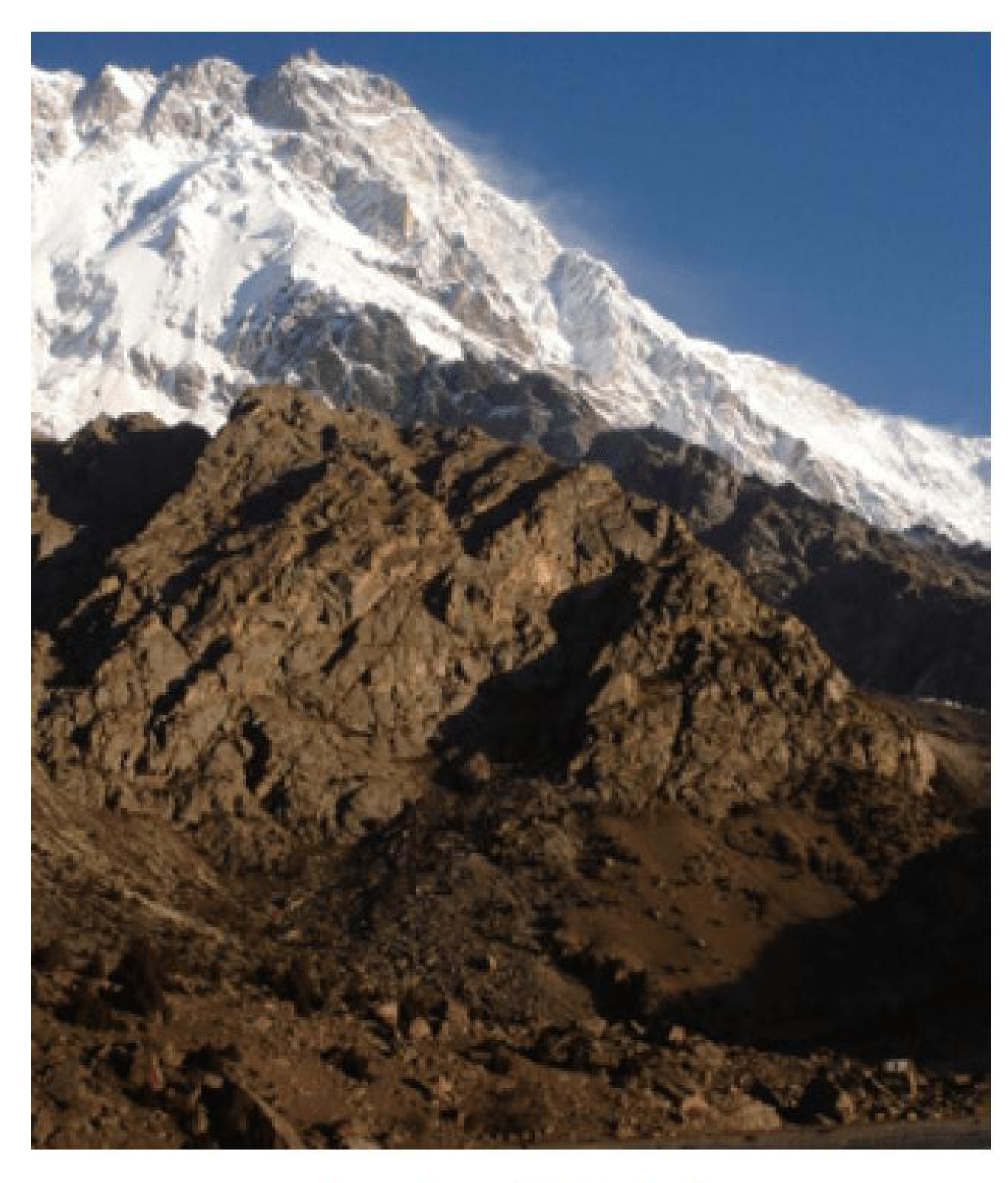


图 10.11　鲁帕尔岩壁

但要是放眼整个太阳系，鲁帕尔岩壁就小巫见大巫了。

1986 年，旅行者 2 号在飞过天卫五的时候，发现了一个巨大的悬崖，后来被称为维罗纳断崖。这是用意大利北部的一座城市来命名的，它是莎士比亚笔下的罗密欧与朱丽叶的故乡。最开始的时候，人们都认为这个

悬崖的高度应该在 5000 米到 10 000 米之间。但 2016 年的一项研究表明，维罗纳断崖的实际高度达到了异常惊人的 20 000 米，这让它一举成为整个太阳系中最高的悬崖。



图 10.12　维罗纳断崖上的蹦极

至于维罗纳断崖到底是怎么形成的，目前还没有定论。有人认为它是源于一次剧烈的小行星撞击，也有人认为它是源于天卫五自身的造山运动。由于目前只有旅行者 2 号造访过天卫五，现有的观测数据完全不足以判断哪种理论是正确的。到目前为止，世界各国的航天部门都没有制订任何重返天卫五的计划；所以在未来很长一段时间里，这都会是一个未解之谜。

现在让我们来开一回脑洞，畅想一下如果有人在维罗纳断崖上蹦极，那会是一种怎样的体验?

为此，我需要先给大家补充一点初中的物理学知识。相信不少人都听说过自由落体运动。它描述的是初速度为零的物体，在只受重力情况下的运动。我们的老朋友伽利略最早发现，自由落体运动可以用一个非常简单的公式来描述，即 $h=\frac{1}{2}gt^2$。这里的 h 是物体下落的高度，g 是它受到的重力加速度，而 t 则是它下落的时间。

顺便说一句，伽利略的这个公式其实不太适用于地球。这是因为地球的质量很大，能留住大气层；这样一来，物体在下落过程中就会受到空气的阻力，而不

再作自由落体运动。但在天卫五上，情况就大不相同了。这是因为天卫五的质量很小，无法留住大气层；这样一来，物体在下落过程中就不会受空气阻力，从而始终保持自由落体运动。

前面说过，维罗纳断崖的高度是 20 000 米。而旅行者 2 号的观测数据显示，天卫五的重力加速度很小，大约 0.08 米 · 秒 $^{-2}$。利用伽利略的公式，很容易算出一个人从维罗纳断崖的顶部掉到底部，总共要花 707 秒。换言之，他有将近 12 分钟的时间来欣赏天卫五上的风景。此外，他落地的速度也只有 56 米 · 秒 $^{-1}$，大概相当于时速 200 千米。花了将近 12 分钟的时间，才均匀地加速到时速 200 千米。如此看来，从维罗纳断崖上纵身跃下，似乎也不算一件特别恐怖的事了。

现在我们来考虑一下着陆的问题。在地球上，人们从高空中跳下时经常使用降落伞和滑翔伞。但在天卫五上，这两种设备就完全派不上用场了。这是由于天卫五根本没有大气，无法产生任何空气浮力。此外，地球上蹦极常用的橡皮绳，似乎也不怎么靠谱。毕竟，要是从澳门塔上跳下来，所需的橡皮绳的长度仅为 200 多米；但如果从维罗纳断崖上跳下来，所需的橡皮绳的长度就得达到 20 000 米。

因此，比较理想的选择是钢铁侠 (图 10.13) 使用的那种反推火箭。以目前的技术水平，当然无法让人像钢铁侠一样在天空中自由飞翔。但仅仅用它来着陆，应该还不是什么特别难的事。

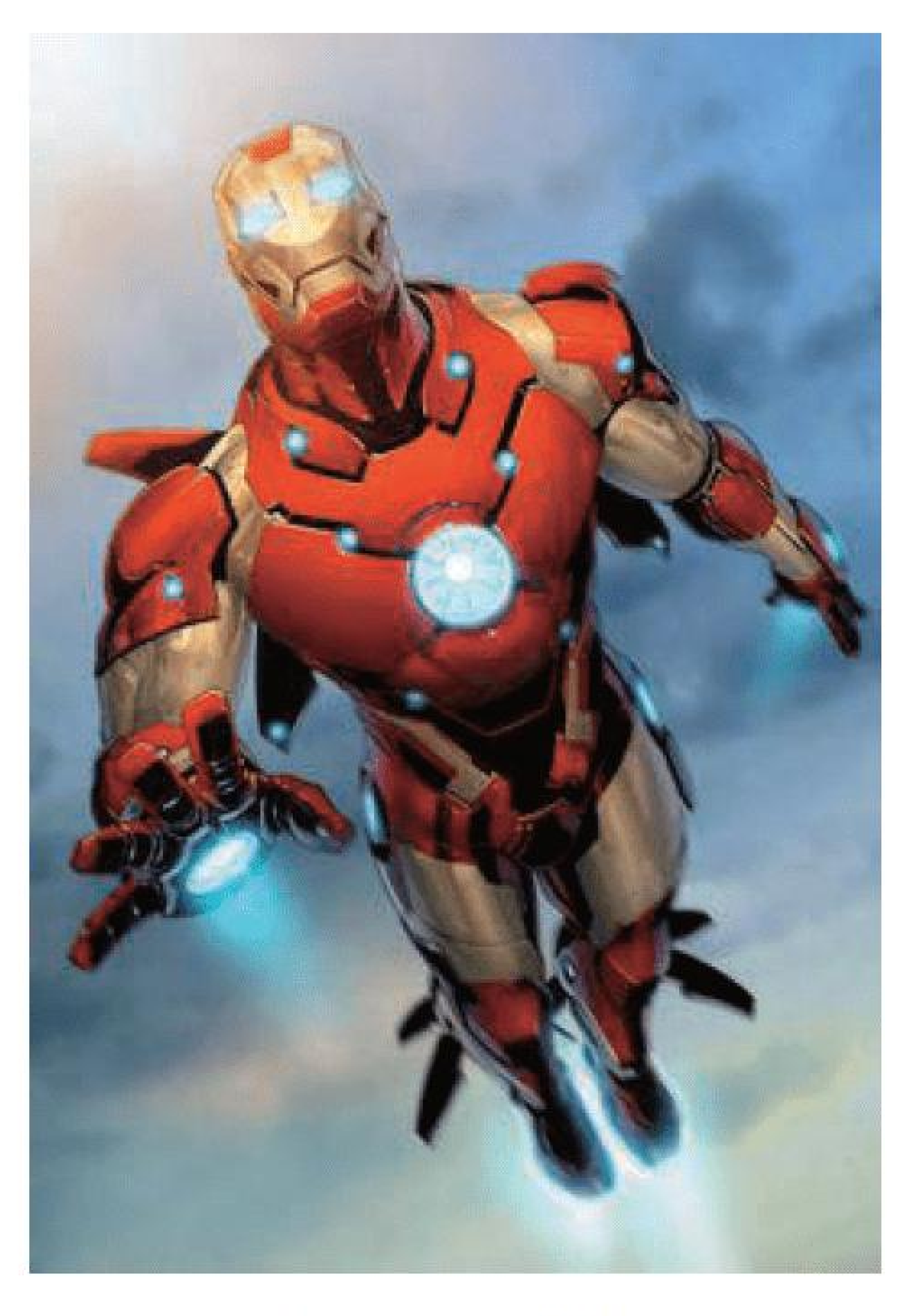


图 10.13　钢铁侠

不妨畅想一下。有朝一日，人类能在天卫五上建立居住点。到那个时候，打扮得和钢铁侠一样，然后从太阳系最高的悬崖上纵身跳下，或许会成为一项非常流行的极限运动。

我们来做个总结。1986 年，旅行者 2 号在天卫五上发现维罗纳断崖。后来的研究表明，它的实际高度达到了 20 000 米，这让它一举成为整个太阳系中最高的

悬崖。旅行者 2 号的观测数据显示，天卫五的重力加速度只有 0.08 米·秒 $^{-2}$；因此，如果有一个人从维罗纳断崖的顶部纵身跳下，大概要花将近 12 分钟的时间才会到达底部。此外，他落地的速度也不快，大概相当于时速 200 千米。这样一来，他只要配备钢铁侠用的那种反推火箭，完全可以很平安着陆。从这个意义上讲，如果有朝一日人类能在天卫五上定居，那么打扮成钢铁侠的样子并在太阳系最高的悬崖上蹦极，或许会成为一项非常流行的极限运动。

11

海王星

11.1 海王星是怎么被发现的?

离开了天王星，让我们前往这次太阳系之旅的第十一站：海王星（图 11.1）。

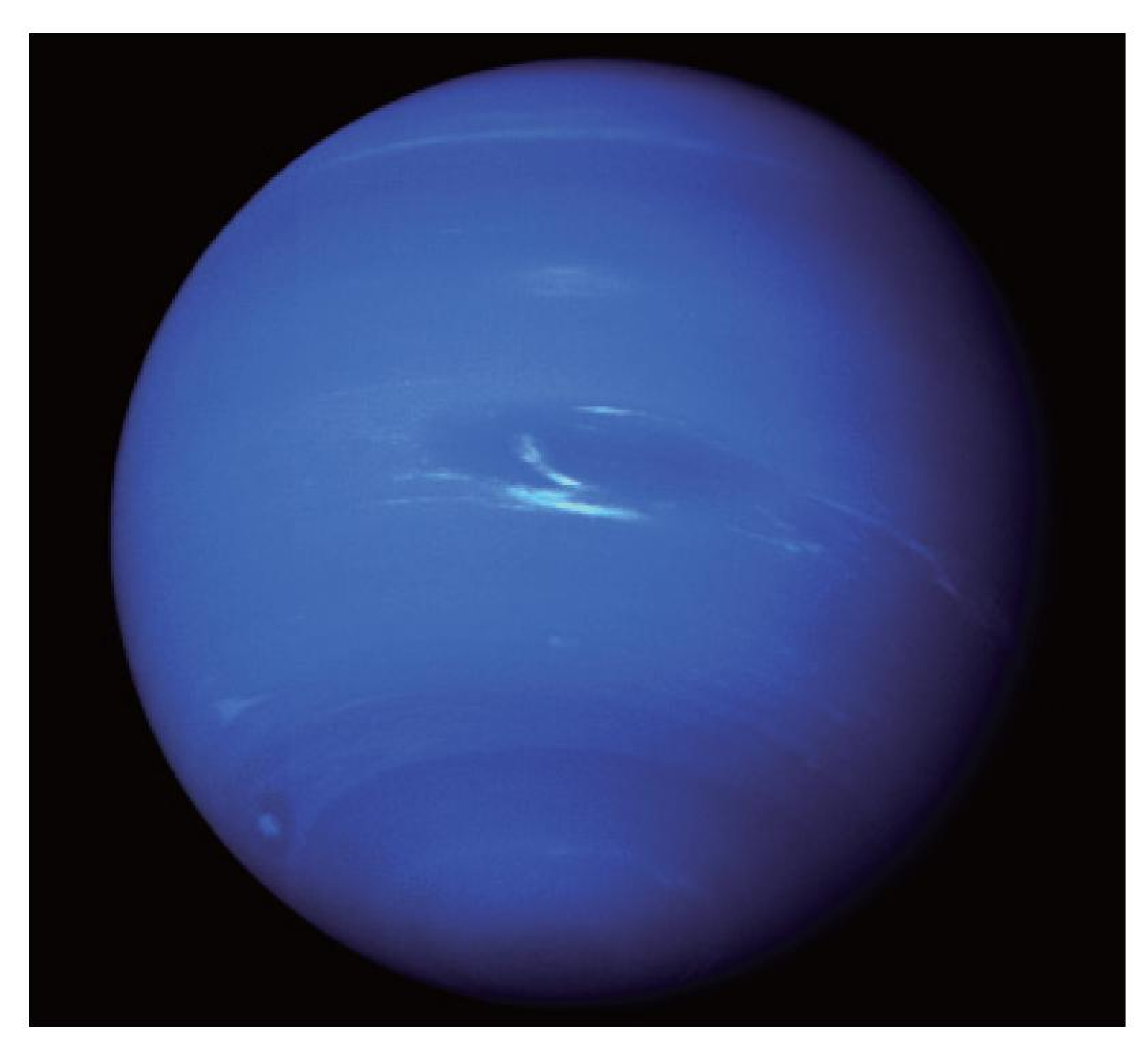


图 11.1 海王星

质量：1.024×10^{26} 千克（地球质量的 17.15 倍）
体积：6.254×10^{22} 立方米（地球体积的 57.74 倍）
与太阳的平均距离：4.50×10^{9} 千米（日地距离的 30.11 倍）

与发现天王星的过程相比，人类发现海王星的故事可谓是精彩纷呈，完全不逊于一部大片。

1686 年，牛顿出版了《自然哲学的数学原理》。在这部堪称物理学界“圣经”的巨著中，他提出了著名的牛顿引力理论（即万有引力定律）。此后 100 多年的

时间里，牛顿引力理论一直是物理学界无可争议的“圣杯”，能很好地解释太阳系中所有天体的运动。直到 1821 年，这个“圣杯”的地位才受到挑战。

那一年，法国天文学家亚历斯・布瓦（图 11.2）发现天王星的运动轨迹与牛顿引力的预言之间存在一定的差异。由于牛顿引力理论实在太成功了，布瓦拒不相信这个“圣杯”会有任何瑕疵。为了拯救万有引力理论，他提出了一个非常大胆的猜想，那就是在天王星之外还存在着第八颗行星。



图 11.2　亚历斯・布瓦

但问题是，这是一个极难证实的猜想。我们知道，基于牛顿引力理论，可以利用已知行星的运动轨迹来计算此行星对近邻行星的干扰，这在天文学上称为“摄动”。但要想验证布瓦的猜想，就必须通过已知行星受到的“摄动”来反推未知行星的轨迹，这就是所谓的“逆摄动”。很明显，“逆摄动”的计算比“摄动”的计算难了不知多少个数量级。因此，在布瓦提出“第八行星”猜想后长达 20 多年的时间里，一直没有人敢挑战这个难题。

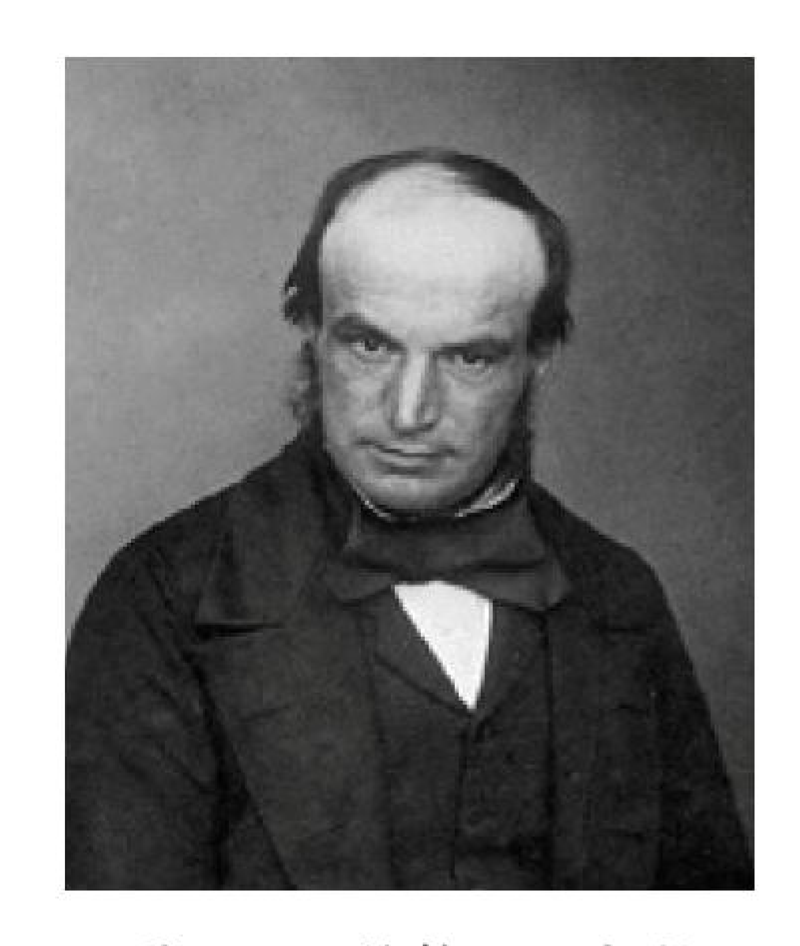


图 11.3　约翰・亚当斯

直到 1843 年，终于有一个年轻的英国人站出来挑战这一难题，他就是英国天文学家约翰・亚当斯（图 11.3）。

当时，亚当斯还只是剑桥大学圣约翰学院的一个初出茅庐的初级研究员。他花了整整两年的时间，通过计算天王星的“逆摄动”来反推那颗未知行星的运动轨道。1845 年 10 月，觉得自己已经大功告成的亚当斯跑去找英国格林尼治天文台台长乔治・艾利（图 11.4），希望后者能根据自己的计算结果来搜寻这颗新的行星。



图 11.4　乔治・艾利

在没有预约的情况下，亚当斯去找了两次。不巧的是，艾利那时恰好在外地开会。因此，亚当斯


图 11.5 奥本·勒维耶

在离开前留下了一份关于“第八行星”运动轨道的手稿。但这份手稿中只列出了亚当斯计算的结果，而没有给出任何关于计算的细节。

艾利看到亚当斯的手稿后非常激动。但与此同时，他又对这个无名青年的计算结果很不放心。所以，他就给亚当斯写信并索要具体的计算过程。诡异的是，亚当斯一直都没回信。这样一来，此事就陷入了僵局。

而亚当斯和艾利不知道的是，就在他们为技术细节扯皮的时候，一个法国人的“阴影”正在向他们不断逼近。此人就是法国天文学家奥本·勒维耶（图 11.5）。

1845 年，同样名不见经传的勒维耶把自己的目标锁定在了寻找太阳系的“第八行星”上。1845 年 11 月，他发表了第一篇论文，从数学上严格地证明了土星和木星的摄动不足以解释天王星的轨道偏离。由于这已是尽人皆知的事实，这篇文章并没有掀起任何的波澜。但在 1846 年 6 月，勒维耶又发表了第二篇论文。这一次，他利用第一篇论文中发展出来的数学技巧，估算出了“第八行星”的大致方位。

不久后，艾利台长就读到了勒维耶的第二篇论文。意识到有外国竞争对手的艾利立刻吓出了一身冷汗。他试探性地给勒维耶写了封信，询问了计算“第八行星”运动轨道的具体细节。身在明处的勒维耶并不知道英国人也在做同样的研究，就大大方方地回答了艾利的问题。

一场堪称生死时速的惨烈竞争就此展开。艾利火速联系亚当斯，让他立刻重新计算“第八行星”的运动轨道。此外，他也指示剑桥大学天文台台长查里斯，尽快用望远镜来搜寻那颗新行星。

参考勒维耶的第二篇论文，亚当斯修改了自己的计算，算出这颗新行星当前的位置应该在黄经 315 度到 350 度之间。查里斯根据这个结果，用剑桥大学天文台的望远镜搜寻了将近两个月，却一无所获。

与此同时，勒维耶也在争分夺秒地改进自己的计算。1846 年 8 月 31 日，他发表了第三篇论文；这一次，他终于确定了这颗新行星的运动轨道，并算出它

当前的位置应该是黄经 325 度。

两天之后，亚当斯也算出了一个确定的结果：此行星当前的位置应为黄经 315 度。但查里斯在这个位置找来找去，还是没有找到任何东西。

接下来，胜利女神向数学更好的法国人露出了微笑。

1846 年 9 月 18 日，勒维耶给自己在柏林天文台工作的一个叫约翰 · 伽勒（图 11.6）的朋友写了封信，让他赶快把望远镜对准黄经325度的区域。

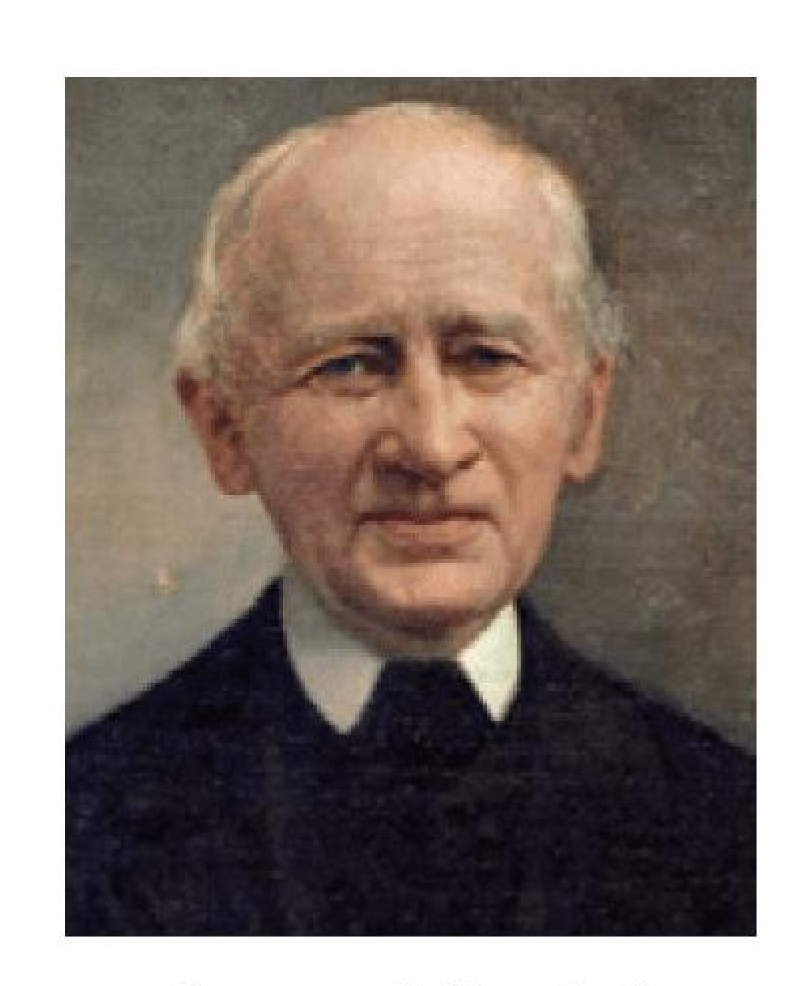


图 11.6　约翰 · 伽勒

5 天之后，伽勒收到勒维耶的信。当天晚上，当伽勒把望远镜指向黄经 325.9 度的时候，赫然发现那里竟真有一个特别亮的新天体！第二天晚上，伽勒继续观测，发现这个新天体的位置发生了移动，这充分说明它的确是一颗行星。第三天，伽勒把自己观测报告的副本寄给了勒维耶。在信中伽勒激动地写道："你算出的那颗行星真的存在！"

海王星就这样被发现了。它是世界上第一颗、也是目前为止唯一一颗完全靠数学计算出来的行星。正因为如此，后来人们也把海王星称为"笔尖上发现的行星"。

欣喜若狂的勒维耶，立刻把这份观测报告复印了很多份，然后寄给欧洲各国的天文机构。当然，海王星的发现，也让整个法国学术界都陷入了狂欢。但法国人还没从狂欢中缓过劲来，就传来了一个让他们目瞪口呆的消息：英国人闹事了！

前面说过，约翰·伽勒发现的海王星的位置，与勒维耶的计算结果仅相差 1 度，而与亚当斯的计算结果相差 11 度。但艾利台长翻出了亚当斯于 1845 年留下的第一份手稿，然后发现这个最早的、没有任何推导细节的计算结果，与勒维耶的结果非常接近。所以，英国人就把这份手稿公之于众，宣称是亚当斯最早算出了海王星的位置。

法国人当然大为不满。法国科学院直接写信质问艾利，既然亚当斯早在 1845 年就已经算出了海王星的轨道，为什么不把它写成论文？一个孤零零的、连推导过程都没有的结果，怎么证明它不是错进错出、歪打正着？英国人也不甘

示弱，反唇相讥。一场口水仗就此爆发。

历史上，英伦三岛和欧洲大陆曾为了重大科学成果的优先发现权，打过很多次口水仗。其中最有名的，莫过于牛顿和莱布尼茨的微积分发明权之争。这场旷日持久的大战，最后造成了英国和欧洲其他各国的“学术隔离”：英国人一直坚持使用牛顿爵士发明的“流数术”记号，直到 100 年后才逐渐接受莱布尼茨发明的微积分记号。

不过，这场海王星发现权之争最后以和平收场。英国皇家学会向勒维耶颁发了天文学会金质奖章，而法国科学院也承认亚当斯做出了独立的发现。两国学术界达成了共识，宣称勒维耶和亚当斯是海王星的共同发现者。

最后再多说几句。此后亚当斯官运亨通，于 1851 年当选为英国皇家天文学会会长。不过随着时间的推移，人们逐渐意识到亚当斯其实并没有算对海王星的位置。所以，现在绝大多数人都不把亚当斯视为海王星的发现者。

而作为海王星的真正发现者，勒维耶获得了极大的荣誉。就在发现海王星的 1846 年，他被选为法国科学院院士；1854 年，他出任巴黎天文台台长，并在这个位置上工作到去世。后来为了纪念他，法国人甚至把他的名字刻在了著名的埃菲尔铁塔上。

我们来做个总结。1821 年，亚历斯・布瓦发现天王星的运动轨迹与牛顿引力的理论预言不符；为了拯救万有引力理论，他提出在天王星之外还存在第八颗行星。19 世纪 40 年代初，英国天文学家约翰・亚当斯与法国天文学家奥本・勒维耶开展了一场堪称生死时速的惨烈竞争。1846 年的 8 月底 9 月初，勒维耶算出新行星当时的位置应该是黄经 325 度，而亚当斯算出的结果是黄经 315 度。1846 年 9 月 23 日，德国天文学家约翰・伽勒听从勒维耶的建议，在黄经 325.9 度的位置找到了这一颗新行星。海王星就这样被发现了。作为世界上唯一一颗完全靠数学计算出来的行星，海王星后来被人们称为“笔尖上发现的行星”。尽管英国人为了获得海王星的发现权而挑起了一场口水仗，但是现在人们已经普遍接受，勒维耶才是海王星的唯一发现者。

前面已经介绍了人类发现海王星的有趣故事。下一节，让我们去见识一下海王星上的恐怖风暴。



11.2 为什么说大黑斑是太阳系中最强的风暴？

让我们先来简单地了解一下海王星。

与天王星一样，海王星也是一颗冰巨星。它的体积比天王星略小，在太阳系的行星中排名第四；但由于它的密度较大，其质量也略大于天王星，在太阳系中排名第三。此外，海王星与太阳的平均距离大概是日地距离的 30 倍，大概需要 165 个地球年才能绕太阳转上一圈。

海王星也有大气层。它的大气中除了有 80% 的氢气和 19% 的氦气，还含有不少甲烷。甲烷就是我们生活中使用的天然气的主要成分，它对太阳光中的红光、橙光和黄光都具有很强烈的吸收作用。这样一来，被海王星大气反射以后的太阳光，就会变得以蓝光为主。因此，海王星看上去就是蓝色的。

再说一件趣事。1981 年，美国天文学家马文・罗斯发现，在海王星内部的高压环境下，由 1 个碳原子和 4 个氢原子构成的甲烷（CH_4）分子并不能稳定存在。这意味着，甲烷分子中的碳原子将被抽离，然后在高压环境中被挤压成钻石。一旦成形，致密的钻石就会下沉；换言之，在海王星的内部，一直都在下一场壮观的钻石雨！

与天王星一样，海王星也只被人类发射的空间探测器拜访过一次。1989 年 8 月 25 日，旅行者 2 号从天王星附近飞过，最近时与海王星大气层仅相距 4400 千米。它发现在海王星的赤道地区，有一个巨大的椭圆形风暴。

这个椭圆的长轴有 13 000 千米，短轴也有 6600 千米；换句话说，它基本能装下整个地球。因为这个海王星风暴看起来是黑色的，所以人们就把它称为大黑斑（图 11.7）。

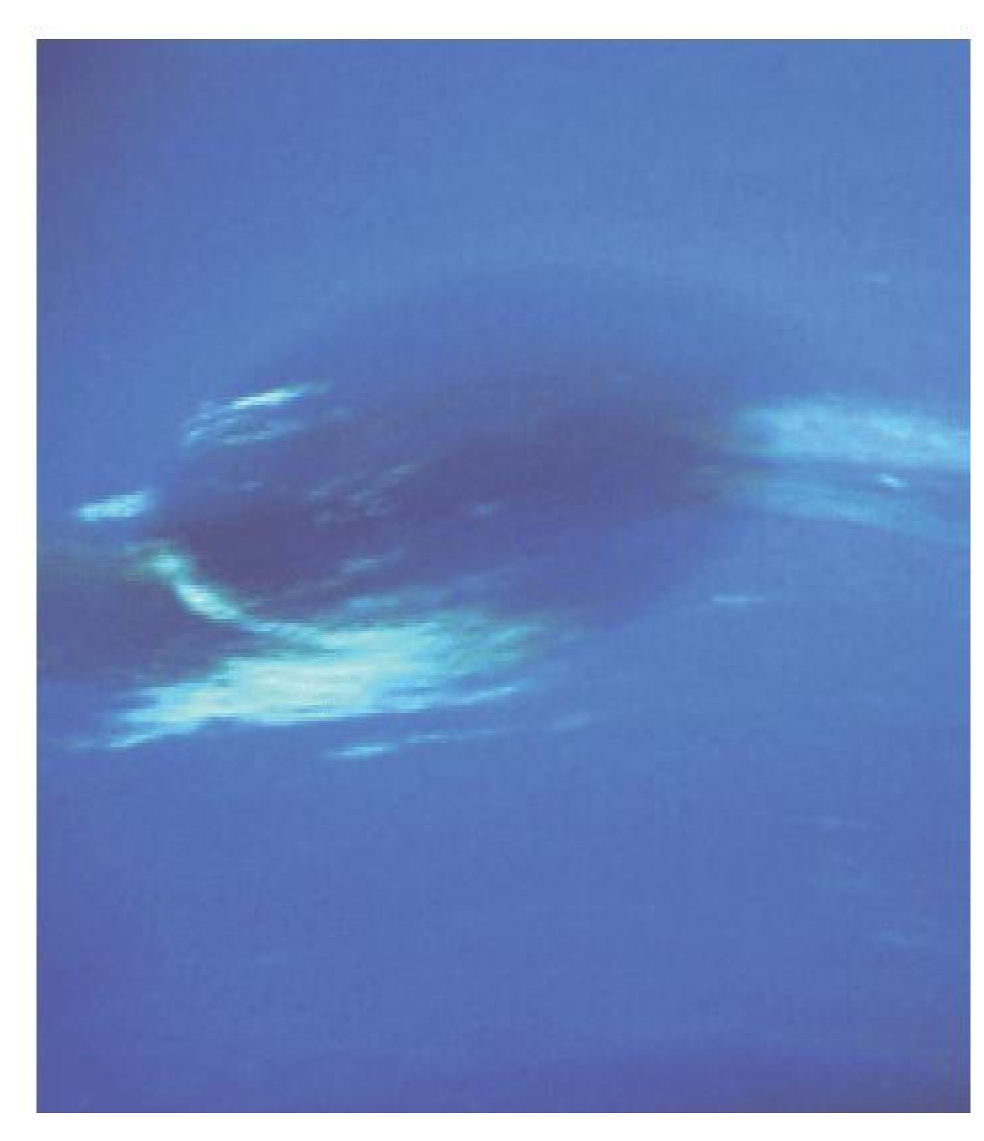


图 11.7 大黑斑

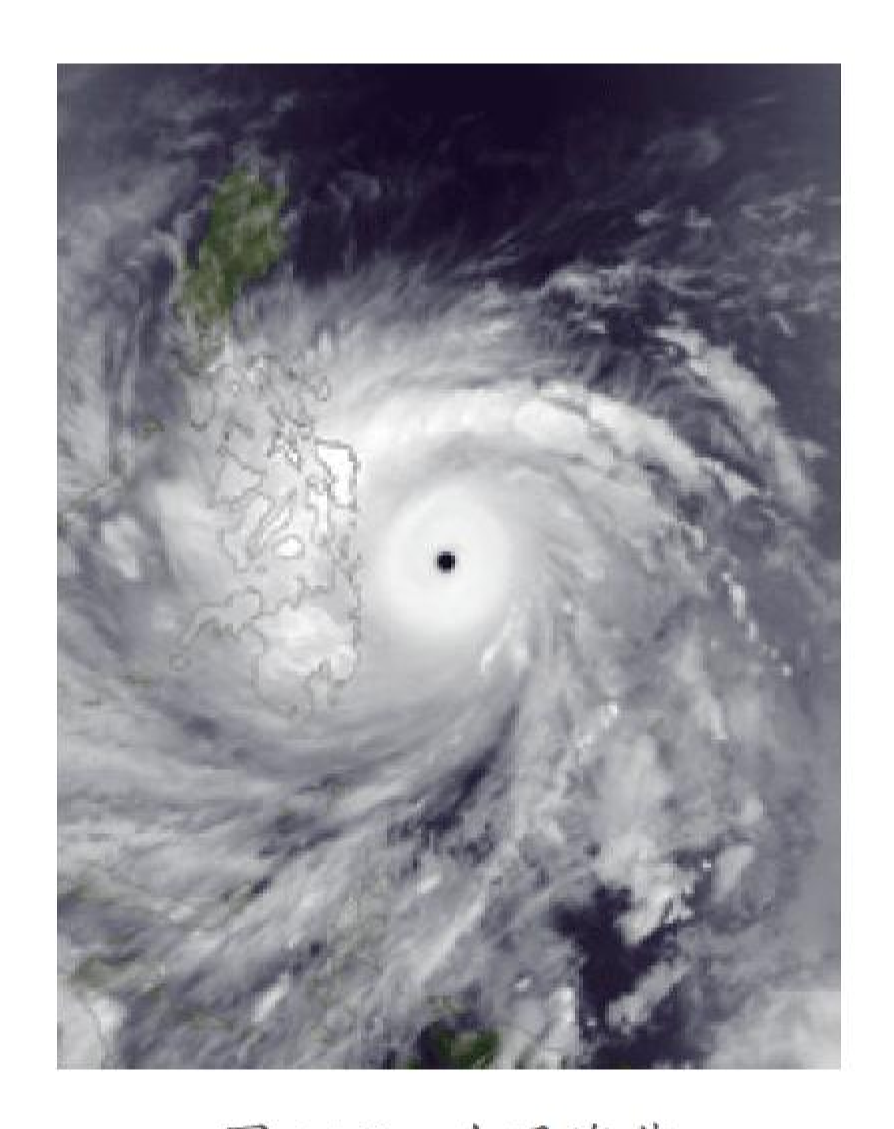
与大红斑一样，大黑斑也是一个反气旋风暴。所谓的反气旋风暴，是指它的气流旋转方向与所处行星的自转方向相反。

大黑斑最大的特点就是它的强度特别特别大。事实上，它是整个太阳系中最强的风暴。


图 11.8　台风天鸽

为了便于大家理解大黑斑的恐怖，让我先来谈谈地球上的风暴。要想衡量一个风暴的强度，有一个至关重要的指标，那就是它的最大风速。

我亲身经历过的最强风暴，是于 2017 年 8 月 23 日登陆珠海的台风天鸽（图 11.8）。对珠三角地区而言，这是一场 50 年一遇的风暴；它刮倒了珠海市大概 50% 的树木，也让澳门直接变成了一座停水停电的孤岛。那天鸽到底有多强呢？它登陆时的最大风速为 48 米 · 秒 $^{-1}$，尚未达到地球上超强台风的标准（即 51 米·秒 $^{-1}$），只能算是一个强台风。


图 11.9　台风海燕

而有气象记录以来的地球最强风暴，是于 2013 年 11 月上旬肆虐于西太平洋的台风海燕（图 11.9）。海燕造成了毁灭性的破坏。光是在菲律宾，就有 6000 多人遇难，此外还有 1000 多人失踪。那海燕又有多强呢？其登陆时的最大风速为 87.5 米 · 秒 $^{-1}$。

当然，要是放眼整个太阳系，海燕的强度就完全不够看了。以我们前面游览过的大红斑为例，它的最大风速能达到 180 米 · 秒 $^{-1}$，超过海燕最大风速的 2 倍。

但与大黑斑相比，大红斑也变得小巫见大巫了。旅行者 2 号的测量结果表明，大黑斑的最大风速能达到 666 米 · 秒 $^{-1}$。换句话说，它的最大风速甚至已经接近地球上声速（即 340 米 · 秒 $^{-1}$）的 2 倍。

我们不妨来开一下脑洞。如果把大黑斑搬到地球上，那会有什么后果？我们前面说过，大黑斑基本能装下整个地球。换言之，地球上没有任何一个地方能够幸免于难。此外，物体的动能与其速度的平方成正比。因此，即使大黑斑的密度与地球超级台风的密度相等，其破坏力也比地球超级台风大了上百倍。在这么恐怖的风暴的肆虐下，地球表面将变得完全不适宜生命生存。到那时，或许只有地底和深海，才有可能留下生命的火种。

下面，我们来聊聊大黑斑的能量来源。

我们的老朋友、英国天文学家哈雷最早提出，地球上之所以会有风暴，归根结底是源于太阳的辐射能量。

不过，由于海王星与太阳的距离远大于日地距离，它所能得到的太阳辐射能量就比地球得到的太阳能量要少很多。下面就来简单估算一下，海王星得到的太阳辐射能量到底比地球要少多少。

众所周知，太阳辐射总是呈球形向外扩散。根据能量守恒定律，每个球面上接收到的太阳辐射总能量都相同。此外，一个球的面积与其半径的平方成正比。因此，某个单位球面上所能接收到的太阳辐射能量（即太阳辐射能量密度），与它到太阳的距离的平方成反比。

海王星与太阳大概相距 45 亿千米，是日地距离的 30 倍；换言之，海王星轨道所能接收到的太阳辐射能量密度，是地球轨道的 1/900。

由于海王星的半径是地球的 4 倍，它能接收到太阳辐射的面积是地球的 16 倍。这意味着，海王星能接收到的太阳辐射能量大概只有地球的 1/56。

很明显，仅靠这么一点太阳辐射能量，根本不可能支撑起太阳系最强的风暴。因此，不同于地球风暴，大黑斑并非源于太阳的辐射能量，而是靠海王星自身的能量维持。事实上，旅行者 2 号的测量结果表明，海王星的内核温度高达 8000℃。正是这个强大的内部辐射源，支撑起了太阳系最强的风暴。

不过，旅行者 2 号发现的超级风暴并不止大黑斑这一个；事实上，它总共发现了 3 个。图 11.10 就是旅行者 2 号拍到的 3 个海王星超级风暴的全家福。上面那个最大的黑色风暴就是大黑斑，下面那个小了很多的黑色风暴叫作小黑斑，而中间那个最小的白色风暴叫作滑板车。

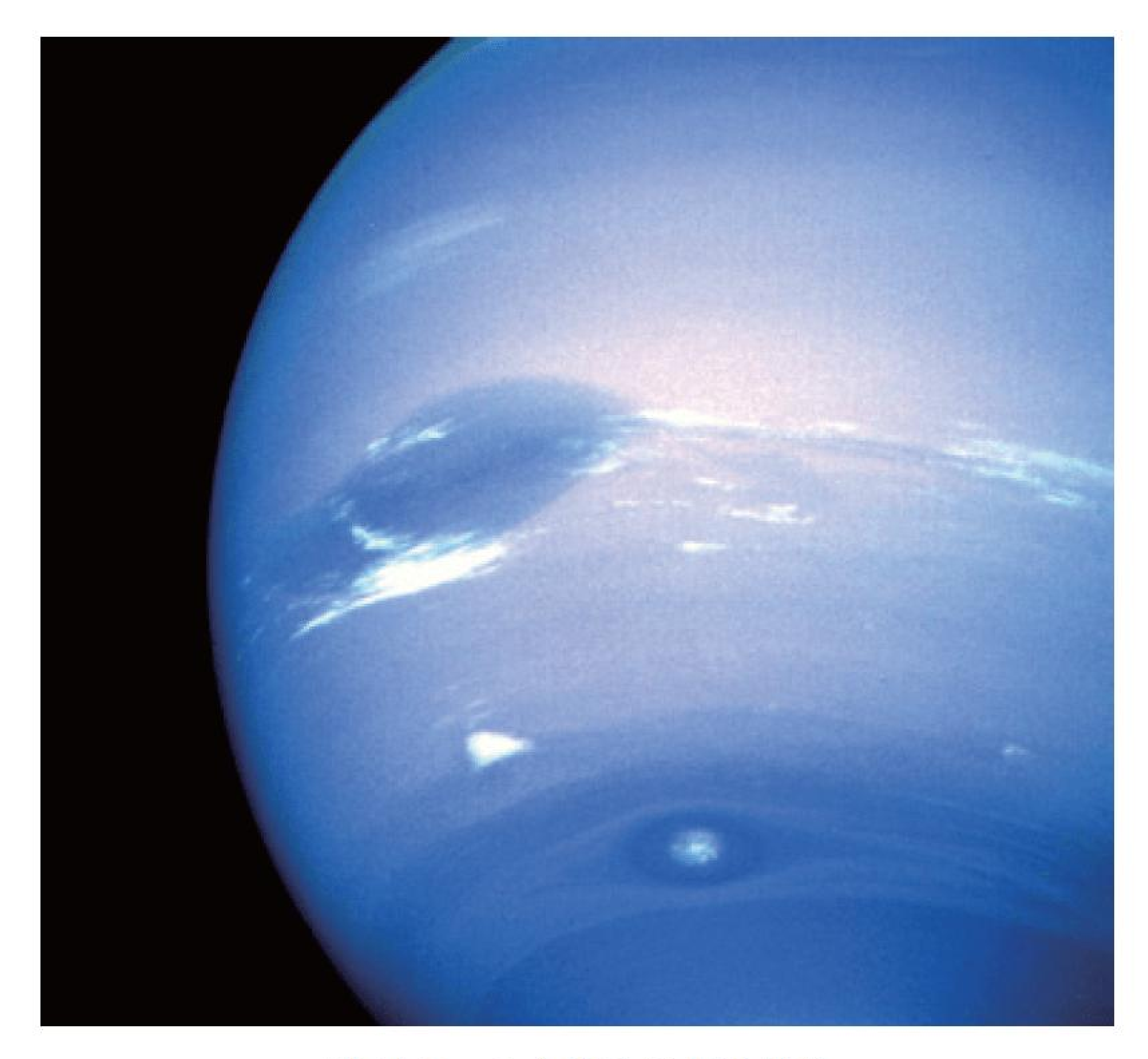


图 11.10　3 个海王星超级风暴

但与大红斑相比，大黑斑的寿命要短很多。1994 年，天文学家们把哈勃空间望远镜指向了海王星，然后发现海王星的那三个超级风暴全都消失了。取而代之的，是一个位于海王星北半球、被称为北部大黑斑的新风暴。

这个发现说明，海王星的大气系统远比人们想象的要复杂。或许要再过几十年，等到下一个太空探测器拜访海王星，我们才能更好地探究海王星大气系统的奥秘。

我们来做个总结。1989 年 8 月，旅行者 2 号发现在海王星的赤道地区有一个黑色的椭圆形风暴，这就是大黑斑。大黑斑的最大风速能达到 666 米・秒 $^{-1}$，接近地球上声速的 2 倍，这让它成为整个太阳系中最强的风暴。如果把大黑斑搬到地球上，地球表面所有的生命都会遇到灭顶之灾。由于海王星能接收到的太阳辐射能量大概只有地球的 1/56，大黑斑其实是靠海王星自身的能量维持。与木星的大红斑相比，大黑斑的寿命要短很多；1994 年，天文学家就发现它已经消失了。

前面已经介绍了太阳系中最强的风暴。下一节，我们要去拜访海王星的一颗非常独特的卫星。



11.3 为什么海卫一不是海王星的亲生骨肉?

在太阳系的 4 颗气态行星中，海王星的卫星数是最少的，只有 14 颗。其中有一颗相当特殊，那就是我们要游览的海卫一（图 11.11）。

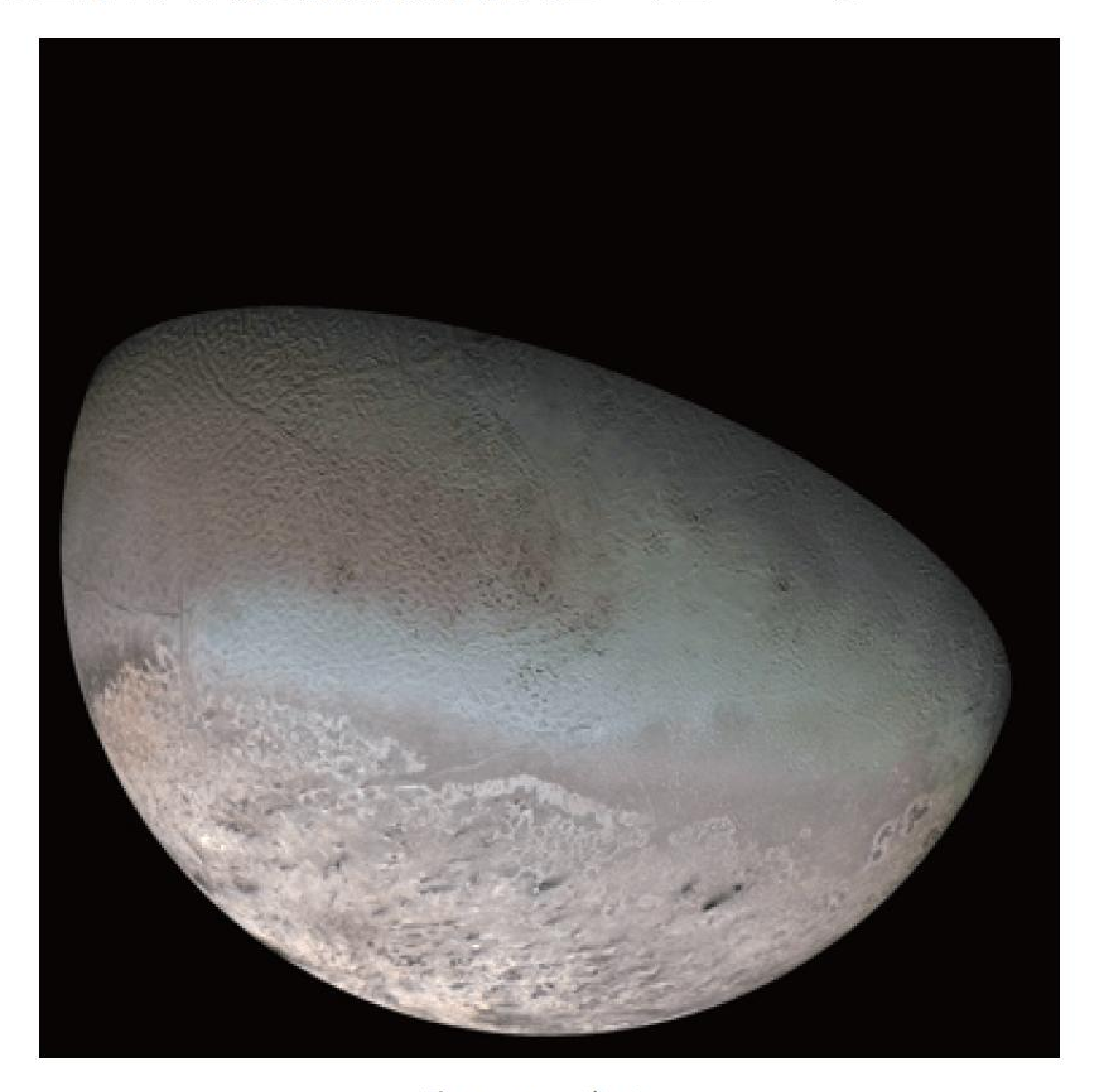
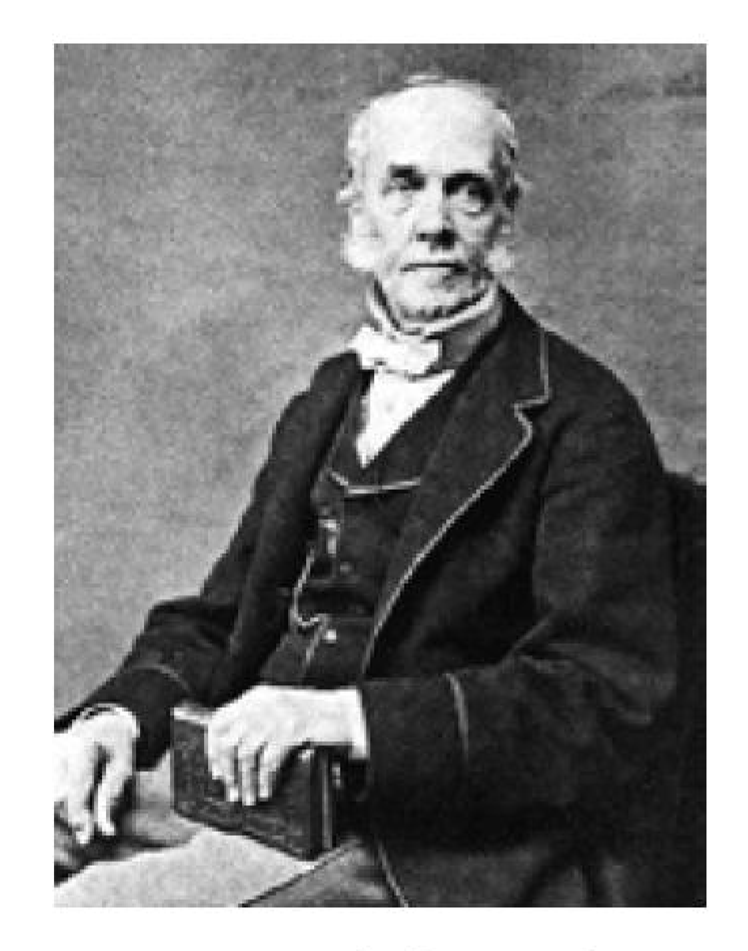


图 11.11　海卫一

我先来讲讲，海卫一是怎么被发现的。

前面说过，1846 年 9 月 23 日，伽勒在勒维耶预言的地方找到了海王星。兴奋不已的勒维耶写了好多信，然后寄给全欧洲的天文机构。其中一封信就落到了英国天文学家约翰·赫歇尔的手里。约翰·赫歇尔是我们前面提到过的威廉·赫歇尔之子，一生中曾 3 次出任英国皇家天文学会会长。他立刻就想到，海王星肯


图 11.12　威廉·拉塞尔

定也有自己的卫星。为了避免这个发现也被法国人抢走，约翰·赫歇尔马上给英国的多位天文学家写信，让他们赶快寻找海王星的卫星。其中的一封信就到了英国天文学家威廉·拉塞尔（图 11.12）的手里。

和威廉·赫歇尔一样，拉塞尔也是半路转行。他出生在曼彻斯特西边的一个小镇，从小就对天文学有着非常浓厚的兴趣。在他 15 岁那年，他爸爸去世了。拉塞尔不得不挑起生活的重担，跑到利物浦去谋生。他的运气极佳，进入了一个特别好的行业：酿酒。只用了短短 7 年的时间，22 岁的拉塞尔就成了一个富一代。

实现了财务自由的拉塞尔，终于能重新开始追逐自己少年时代的梦想。他在利物浦郊区买了一栋大房子，并在那里建立了一个名为“星空”的天文台。“星空”的天文台拥有一个 0.6 米口径的反射式望远镜。在这个望远镜上，拉塞尔率先使用了赤道仪来追踪天体。这种装置能克服地球自转的影响，从而更好地跟踪运动的天体。

收到约翰·赫歇尔来信的拉塞尔，立刻把自己的望远镜指向了发现海王星的天区。在伽勒发现海王星后的第 17 天，拉塞尔就发现了海王星的一颗卫星，那就是海卫一。靠着这个贡献，拉塞尔于 1849 年获得了英国皇家天文学会金质奖章，并于同年被选为英国皇家学会的院士。

与海王星一样，人类对海卫一的认知，也是主要源于旅行者 2 号。

前面说过，海王星拥有 14 颗卫星。但海卫一这一颗卫星的质量，就占到了 14 颗卫星总质量的 99.5%。正是由于质量足够大，海卫一才得以维持自身的球形。

类似于我们前面游览过的天卫五，海卫一也是一个冰封的世界。不过，两者的化学元素构成有很大的差异。在海卫一表面的冰层中，有 55% 的氮，近 45% 的水和二氧化碳，以及不到 1% 的甲烷和一氧化碳。由于表面处于冰封的状态，海卫一反射光线的能力特别强（图 11.13）；照到海卫一上的太阳光，至少有 60% 的部分会被反射。而与它大小接近的月球，就只能反射 11% 的太阳光。

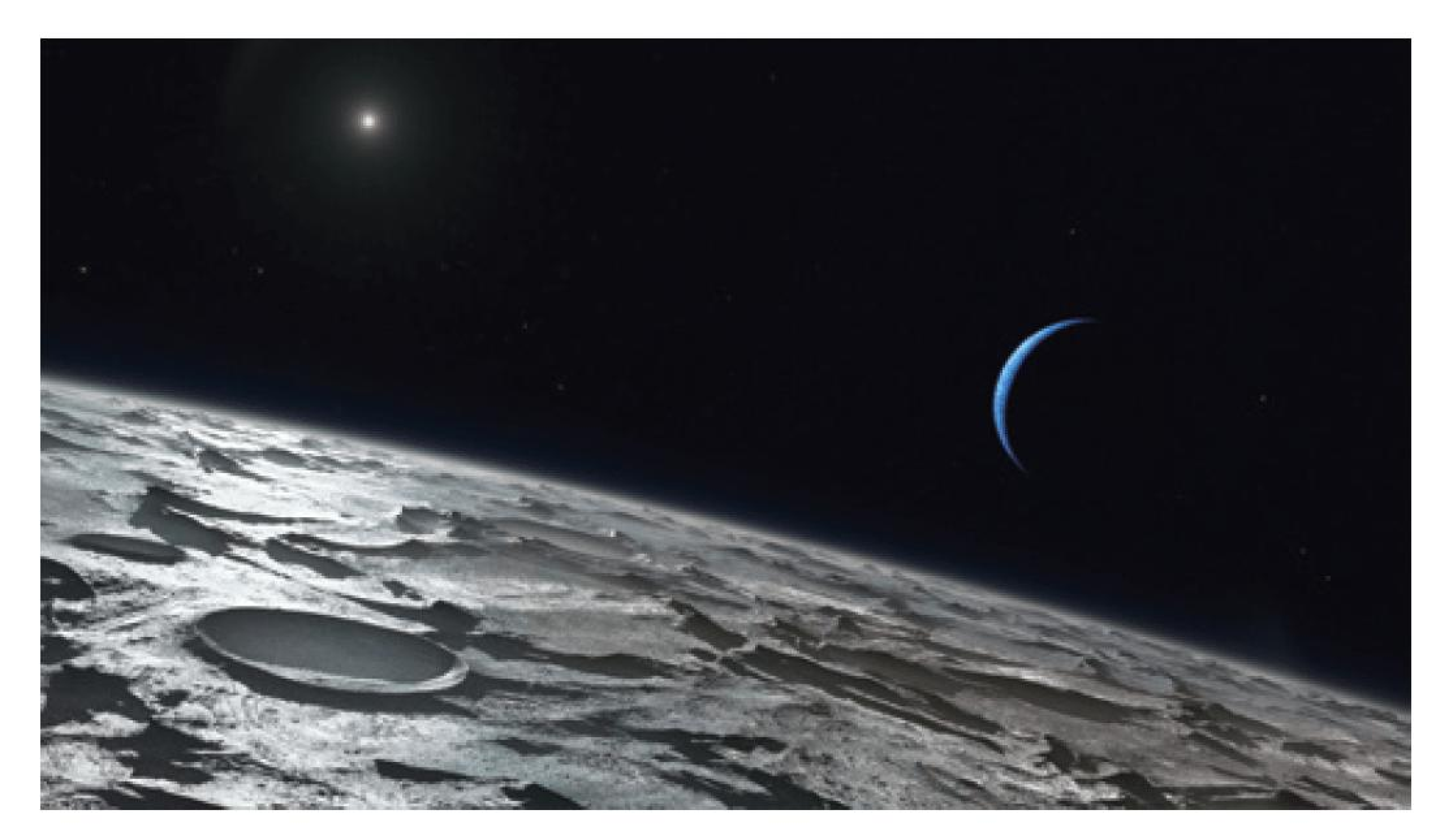


图 11.13　强烈反射太阳光的海卫一

更有意思的是，旅行者 2 号还看到了在海卫一上爆发的间歇泉。这种爆发时间长达一年的间歇泉，能把地表物质送上 8 千米的高空，从而形成一个非常壮观的柱状结构。而这些“喷泉”落地之后，又会大幅重塑海卫一的地形地貌。观测结果表明，这些间歇泉全都集中在海卫一正对着太阳的区域。所以就有人猜想，这些间歇泉爆发的源动力，是太阳的辐射能。

海卫一还有一个独一无二的特征：在整个太阳系中，它是唯一一个绕自己母星（即海王星）的公转方向，与其母星的自转方向相反的大型卫星。正如图 11.14 所示，一般的卫星都沿绿色轨道逆时针地绕其母星公转；只有海卫一，是沿红色轨道顺时针地绕其母星公转。此外，海卫一绕海王星的公转方向，与太阳系八大行星绕太阳的公转方向都相反。

可能你会问了：“方向相反就方向相反呗，这有什么可大惊小怪的？”

答案是，这个现象揭示了海卫一的起源：它并不是与海王星一起形成的，而是在海王星形成以后才变成其卫星。

要想说清楚这是怎么回事，我们需要先回答一个问题：为什么太阳系的八大行星，连同它们几乎全部的卫星，都在同一个平面上绕太阳旋转，并且它们绕太阳旋转的方向也全部相同？

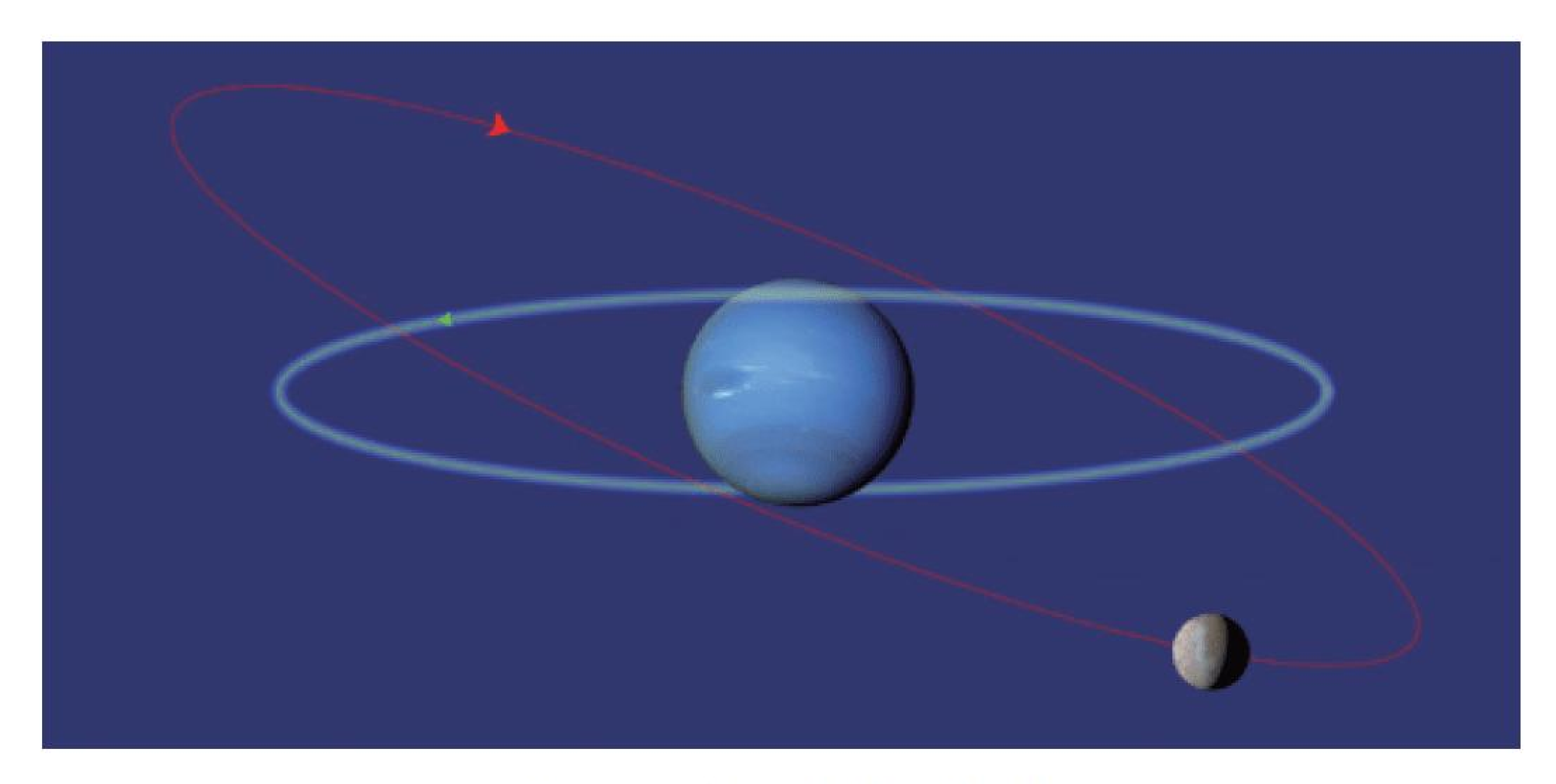


图 11.14　海卫一绕海王星公转

为了解释其中的原理，让我们从中学物理中一个最常见的例子说起。有两个小球，分别是 A 球和 B 球，其中 A 球向左运动，而 B 球向右运动，两者相撞后会粘在一起。现在要问，两球相撞后会处于何种运动状态？

解答这个问题的关键是动量，也就是物体的质量与其速度的乘积。如果 A 球的动量大，两球相撞后就会整体向左运动；如果 B 球的动量大，两球相撞后就会整体向右运动。换句话说，碰撞能使不同方向上的动量互相抵消，从而使整个系统的最终运动方向，变成一开始较大的动量所对应的方向。这就是所谓的动量守恒。

除了动量以外，还有一个描述物体运动状态的关键物理量，叫作角动量。角动量描述的是物体旋转时的运动状态，其大小等于物体的质量乘以其旋转半径的平方，再乘以其角速度。如果物体绕顺时针方向旋转，其角动量方向就垂直于旋转平面向下；如果物体绕逆时针方向旋转，其角动量方向就垂直于旋转平面向上。

类似于动量的情况，碰撞也会使不同方向上的角动量互相抵消，从而使整个系统的最终旋转方向，变成一开始较大的角动量所对应的方向。这就是所谓的角动量守恒。

知道了角动量守恒的概念，我们一开始提的问题就变得很简单了。太阳系的前身是一大团旋转的气体。在引力的作用下，这团气体不断地分裂、塌缩，从而形成了太阳和它的八大行星。一开始的时候，这团气体的旋转也是杂乱无章的；换言之，不同区域的气体也会有不同方向的角动量。但发生碰撞以后，所有弱势

方向上的角动量都会被抵消掉，最后只剩下一个最强势的角动量方向，这就是我们今天看到的八大行星绕太阳公转所对应的那个角动量方向。

为了便于理解，你不妨把太阳系的形成过程想象成一场太阳系的内战。一开始就占据上风的角动量，会通过碰撞的方式逐渐消灭其他方向的角动量，最终让整个太阳系都变得大一统。

那么问题来了:“既然整个太阳系都已经大一统了，为什么还会有海卫一这种旋转方向与其他天体完全相反的捣乱分子呢？”答案是，海卫一并非与海王星一起形成，而是在海王星形成以后才变成它的一颗卫星。也就是说，海卫一并不是海王星的亲生骨肉，而是被它的强大引力所捕获的一个匆匆过客。

我们来做个总结。1846 年 10 月，拉塞尔在海王星被发现后的第 17 天，发现了海王星的第一颗卫星，即海卫一。旅行者 2 号的观测表明，海卫一具有一个独一无二的特征: 在整个太阳系中，它是唯一一个绕自己母星的公转方向，与太阳系八大行星绕太阳的公转方向相反的大型卫星。由于角动量守恒，在太阳系的形成过程中，一开始就占据上风的角动量，会通过碰撞的方式逐渐消灭其他方向的角动量，最终让整个太阳系都变得大一统。因此，海卫一并非与海王星一起形成，而是在海王星形成后才变成它的一颗卫星。换言之，海卫一并不是海王星的亲生骨肉，而是被它的强大引力捕获的一个匆匆过客。



12 太阳系边缘



12.1 冥王星是怎么被发现的?

离开了海王星，让我们前往这次太阳系之旅的最后一站: 太阳系边缘。

如果把太阳系比作一个巨大的城市，那么它的中心城区共有八环。从内到外，这八环依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星（图 12.1）。当然，在四环和五环之间，还有一个废弃的小行星带。太阳系中心城区的半径约为 30 个天文单位（即 30 倍的日地距离），相当于 45 亿千米。而在海王星之外，就是太阳系的城乡接合部，也就是所谓的柯伊伯带。

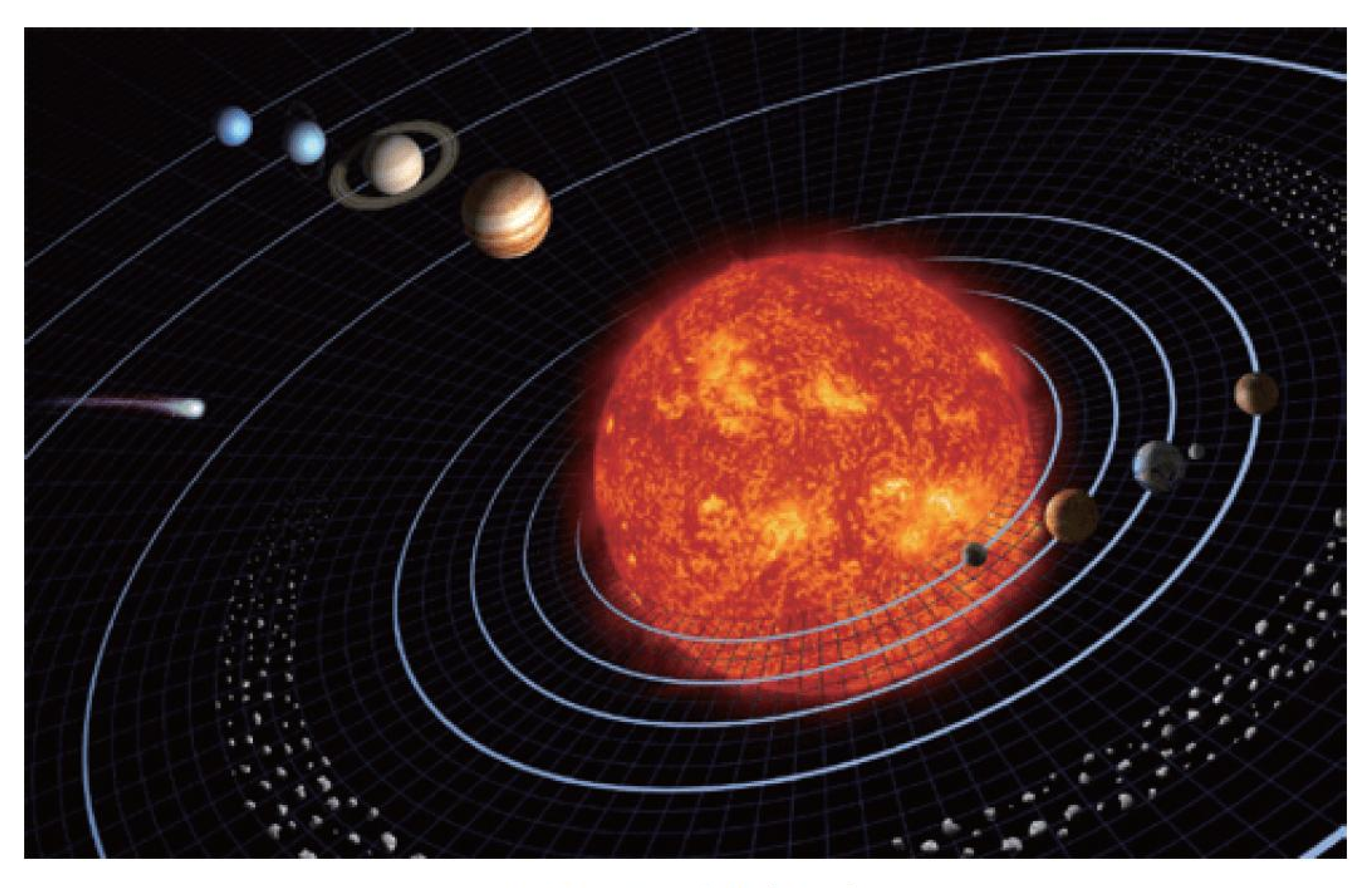


图 12.1 太阳系的中心城区

柯伊伯带（图 12.2）是一个位于海王星轨道之外的圆环状的区域，其内盘与太阳相距 30 个天文单位（即 45 亿千米），而外盘则相距 50 个天文单位（即 75 亿千米）。你不妨把它理解成太阳系的第二个小行星带。

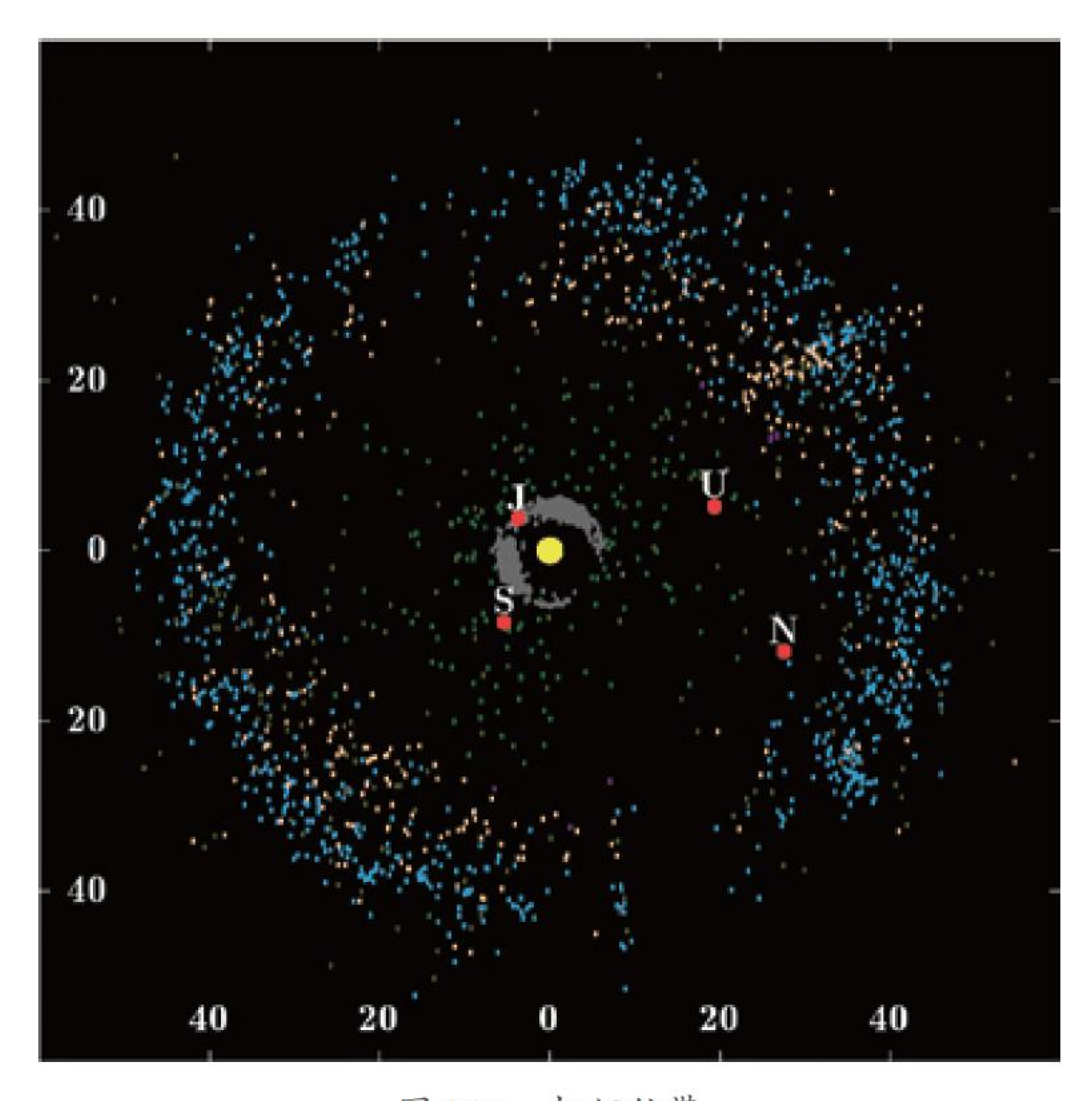


图 12.2 柯伊伯带

其实最早提出柯伊伯带这个概念的人并不是柯伊伯，而是爱尔兰人肯尼斯·埃奇沃斯。1943 年，埃奇沃斯提出了一个大胆的猜想：在海王星之外，还存在着数量惊人的小行星。不过，埃奇沃斯的理论并没有在学术界掀起什么波澜。受到同行的冷落之后，埃奇沃斯一怒之下，就转行去研究经济学了。



图 12.3 杰拉德·柯伊伯

1951 年，美国著名天文学家杰拉德·柯伊伯（图 12.3）提出了一个类似的理论：在海王星之外，存在着一个由大量小行星构成的圆环状区域。由于柯伊伯本身就有很高的学术地位，这个理论一经提出就获得了广泛的关注。所以后来，人们就把这个位于海王星之外的圆环区域称为柯伊伯带。

柯伊伯带中最有名的天体，就是曾被视为

太阳系第九行星的冥王星。下面，就来讲讲人类发现冥王星的故事。

让我们从一个熟人说起。此人就是我们在游览火星时提到过的美国人帕西瓦尔·罗威尔。罗威尔一生中有两大夙愿，其中一个是在火星上找到火星人，另一个则是在海王星之外找到一颗新的行星。事实上，他还提前给这颗新行星起了名字，叫作“X 行星”。为此，他专门跑到亚利桑那州的一座山上，建立了罗威尔天文台。但正如他始终都找不到火星人，罗威尔对“X 行星”的搜寻也以失败告终。

1916 年，帕西瓦尔·罗威尔因病逝世。紧接着，一场特别狗血的肥皂剧就上演了。他的遗孀康斯坦丝·罗威尔为了争夺遗产，跳出来和天文台打了一场长达 10 年的官司。在这 10 年间，天文台的运营受到严重的干扰，搜寻“X 行星”的计划也被迫中止。一直到 1929 年，搜寻“X 行星”的计划才得以重新启动。也正是在那一年，时任罗威尔天文台台长的维斯托·斯里弗，破格雇用了一个从未受过任何专业训练的农家男孩，他就是克莱德·汤博。

1906 年，汤博出生在美国的伊利诺伊州。在他很小的时候，他爸爸在堪萨斯州买了一块农场，所以他们全家就搬到了那里。但是天有不测风云。在汤博 16 岁那年，一场巨大的冰雹，砸坏了他家农场里所有的庄稼。这场灾难让这个家庭陷入了贫穷的泥潭，也断送了汤博上大学的希望。

上不成大学的汤博，只好留在家里的农场工作。按照正常情况，他这辈子就要靠修理地球为生了。但上帝在关上一扇门的时候，往往还会再打开另一扇窗。而属于汤博的这扇窗就是天文学。

为了便于仰望夜空，汤博自己动手制造了一个图 12.4 所示的望远镜。但是仅有望远镜还远远不够，因为汤博还遇到了一个很大的麻烦，那就是堪萨斯的晚上经常刮大风。

为了消除夜晚大风的负面影响，汤博想了一个绝招：他挖了一个 24 英尺[②] 长、7 英尺宽、8 英尺高的大坑，然后跑到坑底去观测。汤博仔细地观察了火星和木星的运动轨迹，然后把它们画下



图 12.4 克莱德·汤博自制的望远望

② 1 英尺 =0.3048 米。

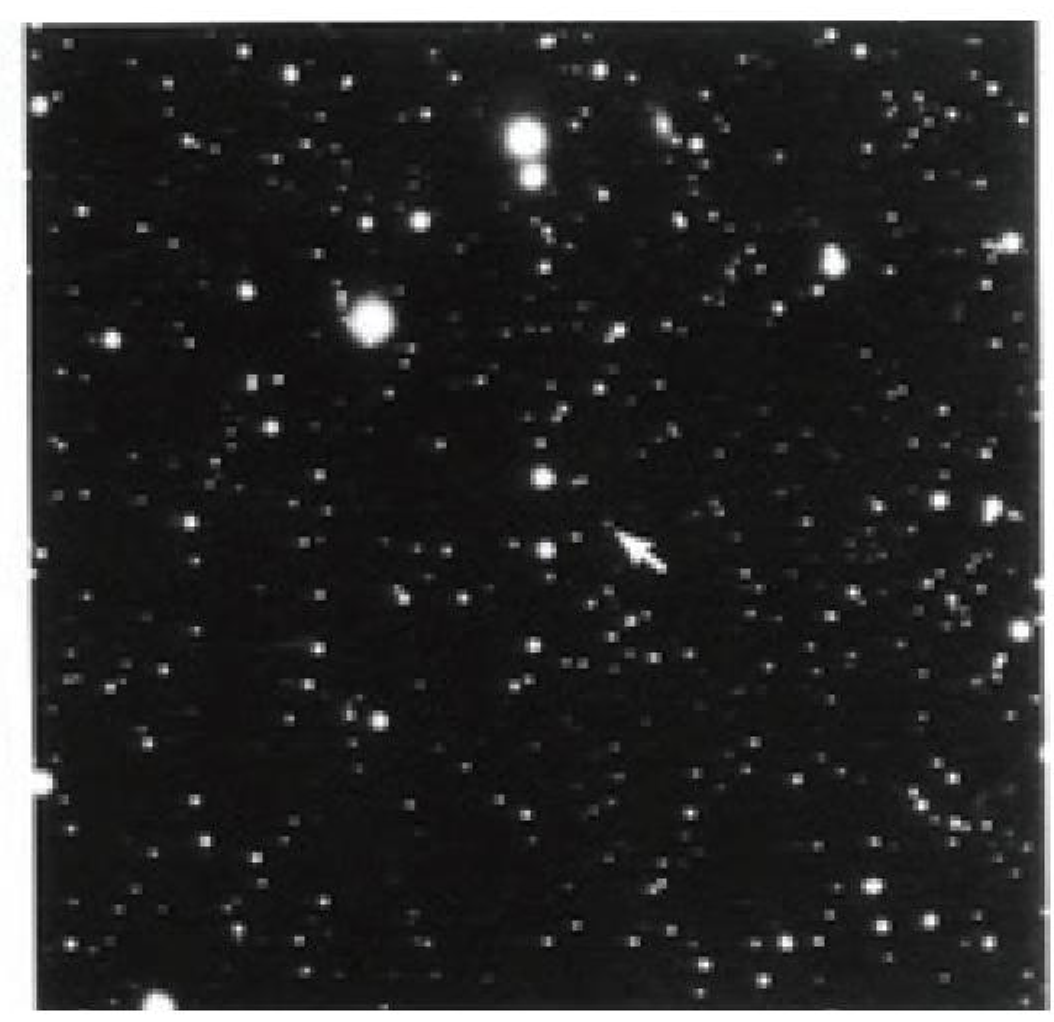
来并寄给罗威尔天文台。这些画作让斯里弗大为惊叹，所以就破格给他提供了一个在罗威尔天文台工作的机会。

1929 年，汤博加盟罗威尔天文台，并立刻加入重新启动的搜寻“X 行星”的计划。他的任务是时不时地在一些可能发现“X 行星”的天区拍照片，然后比较同一天区不同时间的两张照片上，是否存在位置发生改变的天体。这听起来好像挺简单的，其实相当相当困难。打个比方，想象一张 1 米见方的餐桌，上面铺着一块黑色的桌布，并且还随机地撒了一把白色的盐。现在有几千张像这样铺着黑布、撒着白盐的餐桌首尾相连，形成了一条好几千米长的直线。汤博的工作就是沿着这条数千米长的直线巡视，然后找出其中某张餐桌上位置发生了改变的一粒盐。

1930 年 2 月 18 日，汤博终于取得了历史性的突破。通过比较当年 1 月 23 日和 1 月 29 日的两张照片，他终于找到了那粒位置发生了变化的“盐”（即图 12.5 中箭头所指的那个亮点）。



1930 年 1 月 23 日



1930 年 1 月 29 日

图 12.5　冥王星的发现

汤博立刻把同一天区不同时间的照片全都调了出来。经过反复的对比，他最终确认了那的的确确是一颗从未发现的新行星。这个消息一经公布，立刻轰动了全世界。

罗威尔天文台随后发布公告，向全世界征集这个新行星的名字。不久前还在和天文台打官司的康斯坦丝 · 罗威尔也跑来凑热闹，先后提出了三个名字，分别

是“宙斯”“帕西瓦尔”（她亡夫的名字）和“康斯坦丝”（她自己的名字）。当然，对她心怀不满的天文台成员完全没有搭理她。最后，大家一致接受了一个英国 11 岁小女孩起的名字：布鲁托（即 Pluto）。布鲁托是希腊神话中的冥府之神。所以在中国，人们就把这颗新行星称为了冥王星（图 12.6）。

关于汤博，不妨再多说几句。一夜成名后，他终于获得了上大学的机会。1936 年，他在堪萨斯大学获得了天文学学士学位；1938 年，他又在那里获得了硕士学位。此后，汤博一直在罗威尔天文台工作；除了冥王星以外，他后来又发现了几百颗小行星。汤博于 1997 年 1 月 17 日去世，享年 90 岁。

2006 年 1 月，美国 NASA 发射了新视野号空间探测器。这是人类发射的第一个，也是目前唯一一个能够探测冥王星的探测器。除了诸多的科学仪器，新视野号还带上了一件特别有历史意义的东西，那就是冥王星发现者（即克莱德·汤博）的部分骨灰。当然，这也让汤博成了迄今为止在太空中旅行得最远的人类。

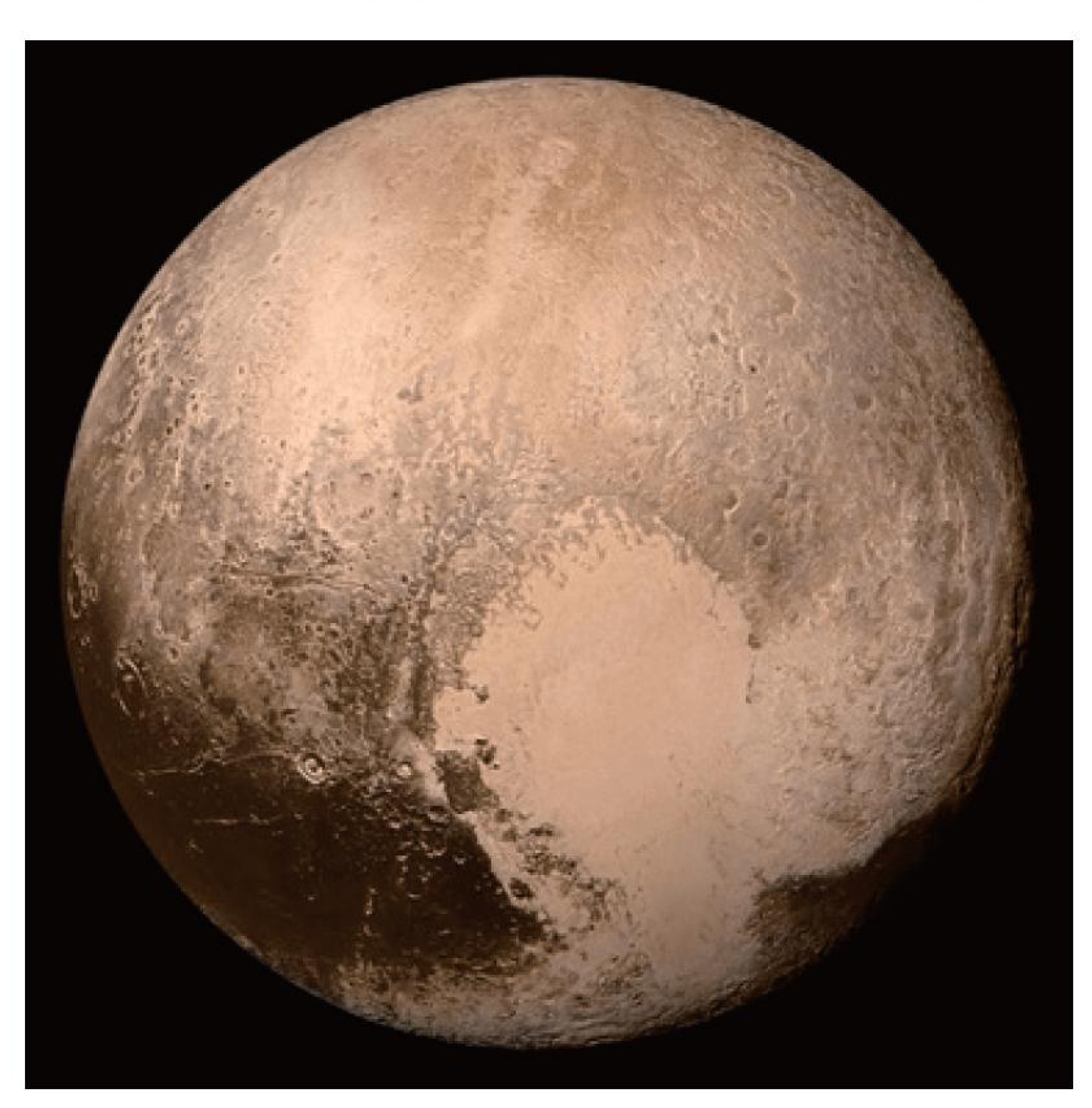


图 12.6　冥王星

在经过了 3462 天的漫长旅行，新视野号于 2015 年 7 月 14 日抵达冥王星，并从与它大概相距 12 000 千米的地方飞掠而过。在此过程中，它拍下了第一张关于冥王星的清晰照片。研究表明，冥王星表面超过 98% 的成分是固态的氮，也就是所谓的氮冰。此外，冥王星也有一些固态的甲烷和一氧化碳，以及一些由冰构成的几千米的高山。

冥王星表面最引人注目的特征，是一个巨大而明亮的心型区域，叫作汤博区。其中特别有趣的是汤博区的左半边（图 12.7），这是一片大小约为 1000 千米的盆地区域。它由大量的鳞片状区域构成，每一片的尺寸都是二三十千米。由于这些鳞片区域的表面都覆盖了反射率特别高的氮冰，所以看起来特别明亮。更重要的是，这片盆地区域特别光滑，上面几乎没有陨石坑。相信你已经反应过来了，这说明冥王星内部也有相当活跃的地质活动。最新的科学研究表明，这片盆地形成的时间，距今大概只有 20 万年。换句话说，它的历史其实并不比我们智人的历史更长久。

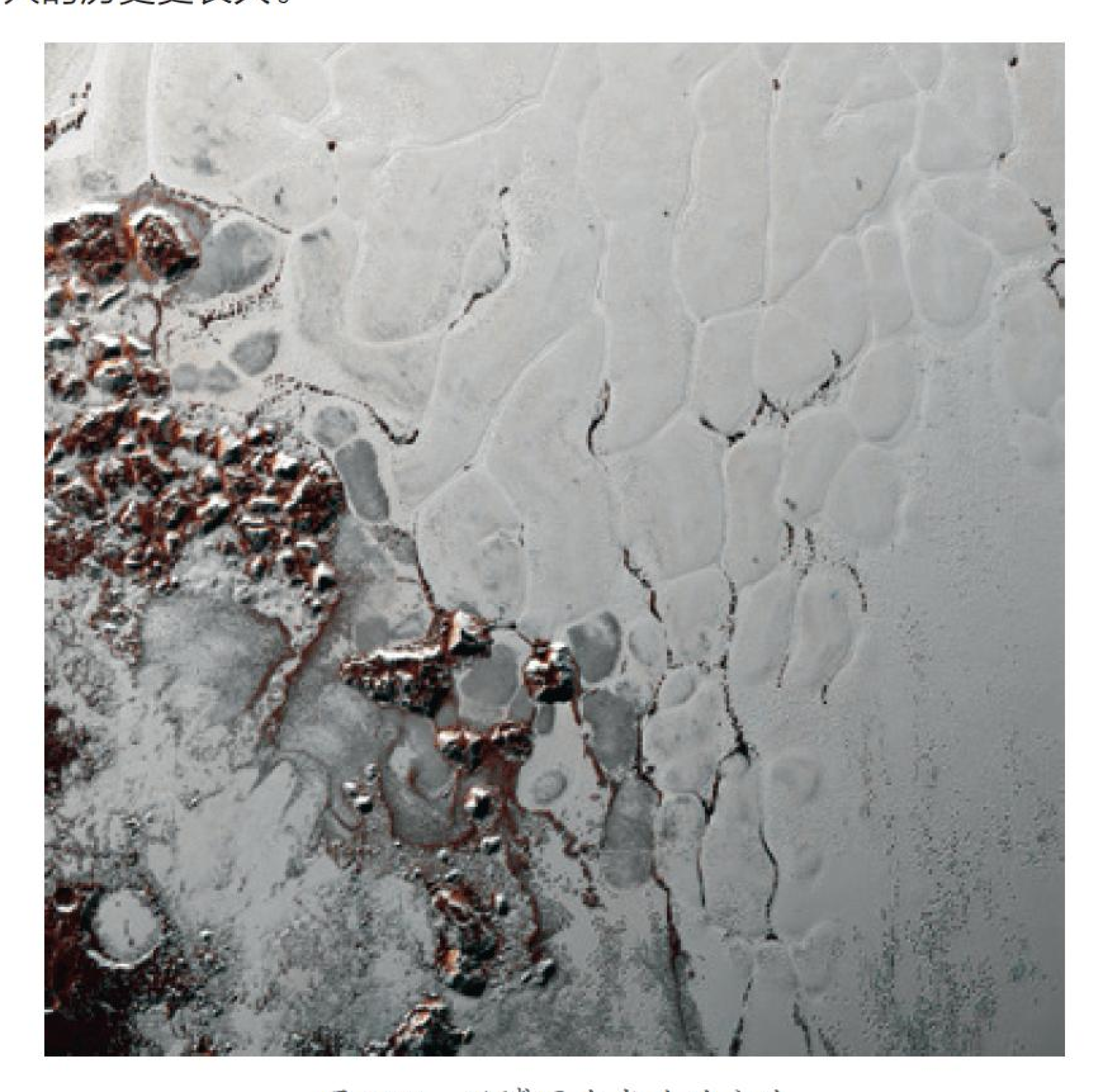


图 12.7　汤博区左半边的盆地

我们来做个总结。如果把太阳系比作一个巨大的城市，那么它的中心城区总共有八环，从内到外依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。在海王星之外，就是太阳系的城乡接合部，即柯伊伯带。柯伊伯带中最有名的天体是曾被视为太阳系第九行星的冥王星。1930 年 2 月 18 日，通过比较同一天区 1 月 23 日和 1 月 29 日的两张照片，克莱德·汤博第一个发现了冥王星的存在。此事的难度，相当于从绵延数千米、铺着黑色桌布的餐桌上，找出一粒位置发生改变的盐。这也让汤博从一个曾经辍学的农家男孩，一跃成为青史留名的大天文学家。

前面已经介绍了冥王星如何登上太阳系第九行星的宝座。下一节，讲讲它如何从这个宝座上跌下来。

12.2 冥王星是怎么被降级的?

1919 年，国际天文联合会在法国巴黎正式成立。到目前为止，它已经拥有了 79 个成员国，是世界上规模最大的国际天文学组织。而所有天体的命名和分类，都由它统一管理。

按照传统，国际天文联合会每隔三年就会召开一次全体会议。2006 年 8 月，国际天文联合会第 26 届大会在捷克首都布拉格召开。按理说，这个专业性极强的天文学大会，是不会有任何圈外人关注的。但在 8 月 24 日，这个会议却突然成了全球媒体关注的焦点。因为在那一天，经过 2000 多位天文学家的投票表决，国际天文联合会通过了一项决议，把冥王星逐出了行星的行列。

可能你会问:“冥王星到底招谁惹谁了? 为什么要把它逐出行星的行列呢? ”下面，我就来给你讲讲此事的来龙去脉。

冥王星的第一根软肋是它的质量太小。由于相距甚远，很长一段时间人们都无法准确测出冥王星的质量。20 世纪 30 年代初，一些天文学家通过分析冥王星的引力对天王星和海王星轨道的影响来估算它的质量，算出的结果与地球质量相差无几。到了 40 年代末，基于一个精度更高的望远镜观测到的数据，柯伊伯重新计算了冥王星的质量，然后发现以前的结果错得厉害。柯伊伯的研究表明，冥王星的质量只有地球质量的 1/10，大概和火星差不多。

但后来人们发现，这种基于力学分析的方法其实并不靠谱，因为它假设天王星和海王星的轨道变化完全是由冥王星引起。而事实上，在冥王星的轨道之外，还有很多其他的天体。一直到 70 年代，天文学家才终于找到比较靠谱的计算方法：分析冥王星的反照率，也就是它发射太阳光的本领。这让冥王星的质量再次大幅下降，变得还不到地球质量的 1%。目前最新的研究结果表明，冥王星的质量大概只有地球质量的 0.2%。那么问题来了。月球的质量能达到地球质量的 1/81，却只能老老实实地当一颗卫星。冥王星的质量大概只有地球质量的 0.2‰，它凭什么当一颗行星？（图 12.8）

1978 年，人们又发现了冥王星的第二根软肋，也就是它的卫星卡戎（图 12.9）。作为一颗卫星，卡戎大得异乎寻常。它的半径能达到冥王星的一半，



图 12.8　冥王星、月球和地球



图 12.9　冥王星与卡戎

质量也能达到冥王星的 1/10。更夸张的是，冥王星和卡戎居然彼此形成了 1 ∶ 1 的潮汐锁定。换言之，不止卡戎有一面要永远正对冥王星，冥王星也有一面要永远正对卡戎。在整个太阳系中，这都是绝无仅有的奇观；还没有其他任何一颗卫星，能 1 ∶ 1 地潮汐锁定自己的母星。很自然地，有人就提出了疑问："一个被自己卫星 1 ∶ 1 潮汐锁定的天体，有资格当一颗行星吗？"


图 12.10　迈克尔・布朗

尽管有这两大软肋，在整个 20 世纪，冥王星还是守住了太阳系第九行星的地位。毕竟，它是一颗直接环绕太阳公转的天体，而且它的块头也比卡戎大了不少。但到了 21 世纪，冥王星就遇到了它命中注定的克星。此人就是美国天文学家迈克尔・布朗（图 12.10）。

布朗一生都很顺风顺水。他在普林斯顿大学拿到了物理学的学士学位，又在加州大学伯克利分校拿到了天文学的博士学位。1997 年，32 岁的布朗当上了加州理工学院的助理教授；6 年之后，他就晋升为正教授。

但当上正教授没多久，布朗就遇到了一件很糟心的事情。多年来，他一直希望能在冥王星的轨道之外找到太阳系的第 10 颗行星。2004 年 12 月，他真的在冥王星之外找到了一个大块头的新天体。尽管它的质量明显小于冥王星，不太可能会被当成行星，但这仍然是一个很重要的发现。

但是布朗并没有立刻公布他的发现，因为他希望做更多的观测，来更好地确定这个新天体的性质。一直拖到 2005 年 7 月，他才把相关论文写好。就在这时，布朗的女儿出生了，这让他没有时间去投稿。所以 7 月 20 日，布朗在加州理工学院的网站上发布了一条公告，说自己在冥王星之外找到了一个新天体；他将在当年 9 月的一个学术会议上，正式报告自己的发现。

让布朗万万没想到的是，2005 年 7 月 29 日，一个西班牙的科研团队在网上发表了一篇论文，宣布他们在冥王星之外找到了一个新天体；根据西班牙人公布的天体运动轨道，这恰好是布朗发现的那一个。

自己半年前发现的新天体，却被别人抢先发表，这已经够倒霉了。但没过多

久，布朗就发现了让他更加愤怒的事情：在发布他们的论文之前，西班牙团队曾经访问过加州理工学院的网站，并且下载了相关的数据。所以布朗怀疑，西班牙人是看了他挂在网上的资料以后，才去搜寻这个新天体的。

西班牙团队则反唇相讥，说他们早在 2002 年 12 月就已经拍到了这个新天体的照片；之所以会访问加州理工学院网站并下载数据，只不过是为了确认此天体以前不曾被其他人发现。此外，加州理工学院网站上关于此天体的信息不详，根本无法确定其轨道。布朗之所以会对他们横加指责，只不过是为了抢功罢了。

你来我往，美国人和西班牙人就吵了起来，后来一直闹到了国际天文联合会。最后国际天文联合会和了稀泥，把发现权给了西班牙团队，而把命名权给了布朗团队。这个新天体后来被称为妊神星。

自己好不容易找到的新天体被别人抢走，这确实挺窝心的。不过幸运的是，在 2005 年初，布朗又在冥王星之外发现了两个大块头的新天体，分别是 1 月 5 日发现的阋神星，以及 3 月 31 日发现的鸟神星。妊神星被抢之后，布朗丢下自己刚出生的女儿，没日没夜地写稿子，终于赶在 7 月 31 日，在网上贴出了宣布自己发现阋神星和鸟神星的文章。

妊神星和鸟神星的质量，大概都是冥王星质量的 1/3，所以并不会对冥王星构成实质性的威胁。但图 12.11 所示的阋神星的质量，却比冥王星质量还大了 27%；这也让它超越冥王星，成了直接环绕太阳公转的质量第九的天体。按照常理，阋神星肯定应该算是一颗新的行星。如果不出意外，布朗将成为太阳系第 10 颗行星的发现者，与赫歇尔、勒维耶和汤博并驾齐驱。

但意外却发生了，还发生了两次。

按照学术界的惯例，一项重大科研成果要想流传于世，必须得到整个科学共同体的认可。所以迈克尔·布朗就写了一份把阋神星列为第 10 颗行星的提案，希望能在国际天文联合会的第 26 届大会上获得通过。但很快就有人提出质疑："妊神星和鸟神星的质量也和冥王星相差无几，为什么不能一起列为行星？"

尽管不情愿与西班牙人分享行星发现者的荣誉，布朗还是做了妥协。他修改了自己的提案，建议把这三个新天体都列为行星。

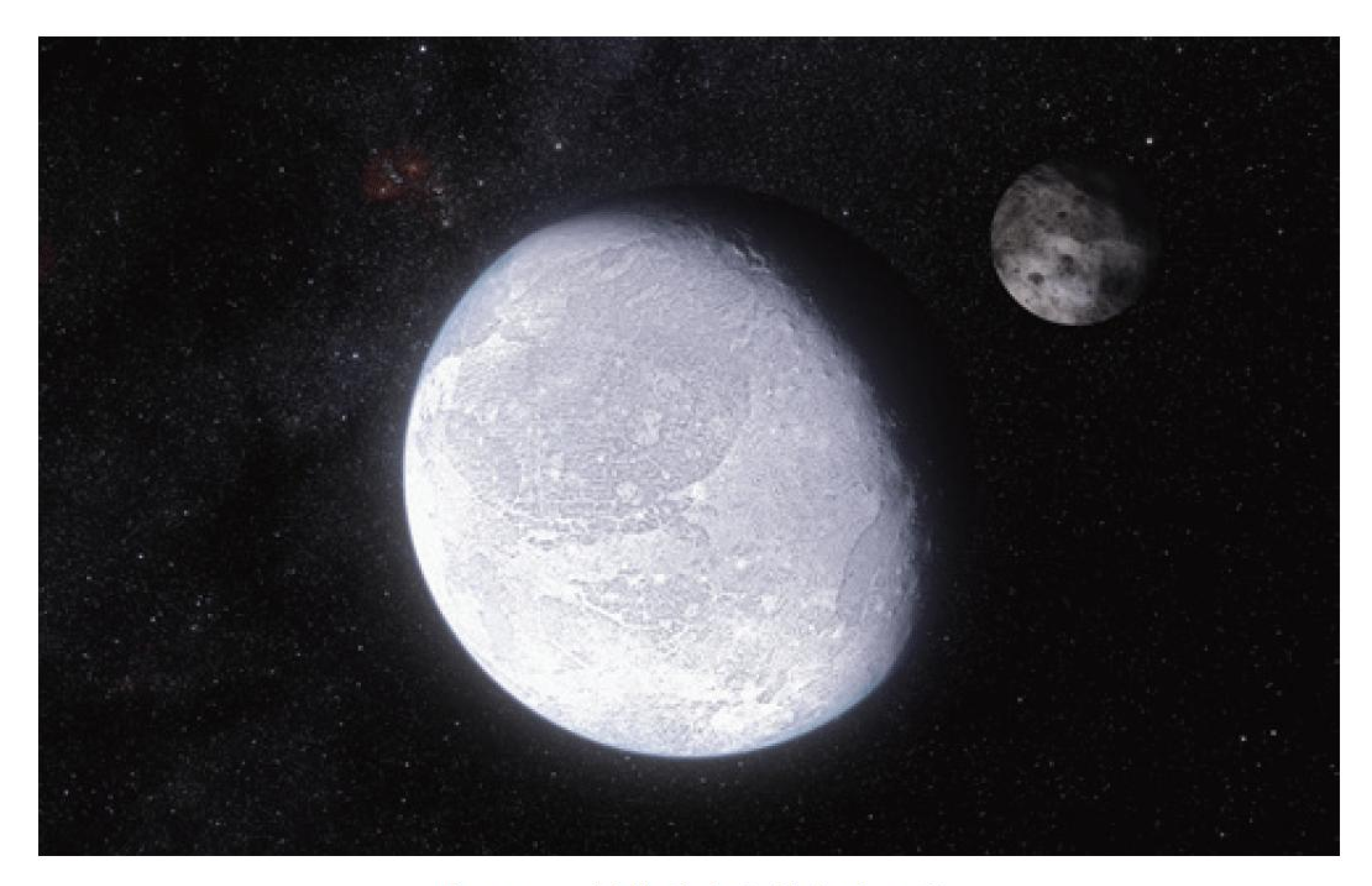


图 12.11　阋神星和它最大的卫星

没想到，又有其他人跑出来闹事了。他们质疑道："谁能保证未来不会再发现其他新天体？要是发现一个新天体，就算作一颗新行星，那还成何体统？"

有 2000 多名天文学家参加的国际天文联合会第 26 届代表大会，就这样吵成了一锅粥。

无奈之下，布朗抛出了第三个提案：既然做不成加法，那就干脆做减法吧。经过反复的辩论，国际天文联合会最终接受了这份提案，对行星的定义进行了修改。

按照新定义，一颗行星必须同时满足以下三个标准：第一，它必须直接围绕太阳旋转；第二，它的质量要足够大，让它的外观能维持球形；第三，它必须能清除自己运动轨道上的所有天体。最后这一点，你不妨理解成"卧榻之侧岂容他人鼾睡"。

很显然，冥王星满足不了第三个标准。因此，躺着中枪的冥王星就这样莫名其妙地丢掉了行星的身份，而与阋神星、妊神星、鸟神星、谷神星和卡戎星一道，被划分成了矮行星。

由于"干掉"了冥王星，布朗被著名的《时代》杂志选入了 2006 年全球最有影响力的 100 个名人。此外，他也获得了一个特别彪悍的绰号：冥王星杀手。

我们来做个总结。作为一颗行星，冥王星一直都有两大软肋：自身质量只有地球质量的千分之二，以及有一颗能把自己 1 ∶ 1 潮汐锁定的卫星。尽管如此，在整个 20 世纪，它还是守住了太阳系第九行星的地位。但在 2004 年末 2005 年初，迈克尔·布朗在海王星的轨道之外发现了三个块头很大的新天体；其中妊神星和鸟神星的质量都达到了冥王星质量的 1/3，而阋神星的质量更是比冥王星质量还大了 27%。按理说，比冥王星还大的阋神星肯定应该被视为一颗行星。所以在 2006 年，布朗向国际天文联合会第 26 届代表大会提交了一份提案，希望把阋神星列为太阳系的第 10 行星，却惨遭否决。随后，他又提交了一份新提案，建议把这三个新天体都列为行星，结果再次被否决。一怒之下，布朗提交了第三份提案，建议修改行星的定义，把冥王星赶出行星的行列。经过 2000 多位天文学家的表决，这份提案终于获得了通过。躺着中枪的冥王星，就这样莫名其妙地丢掉了行星的身份。

2006 年之后，全世界所有的中小学课本都做了修改，宣称太阳系里总共有八大行星。但在天文学界，并不是所有人都认可这种说法。下一节就来讲讲到底是谁发出了反对的声音。

12.3 太阳系中真的只有八颗行星吗?

前面讲过，海王星之外就是柯伊伯带，即一个内环半径为 45 亿千米、外环半径为 75 亿千米的圆环区域。柯伊伯带中最大的天体是冥王星。当然，由于它已经被降级成了一颗矮行星，其英文名已经由原来的“Pluto”改为了现在的“134340 Pluto”。柯伊伯带的天体还包括另外两颗矮行星，也就是前面说过的妊神星和鸟神星。此外，柯伊伯带中还包含着海量的小行星。

在柯伊伯带之外，还有一个被称为“离散盘”的圆环区域。它的内侧与柯伊伯带的外侧重合，而它的外侧则能一直延伸到与太阳相距 100 个天文单位，也就是 150 亿千米的地方。不同于柯伊伯带天体，离散盘天体的运动轨道基本都是一些特别狭长的椭圆。离散盘中最大的天体就是把冥王星拉下水的阋神星；根据目前的观测数据，人们算出它最远的时候与太阳相距 97 个天文单位。图 12.12 就展示了海王星轨道之外的一些块头最大的天体，以及它们的卫星。

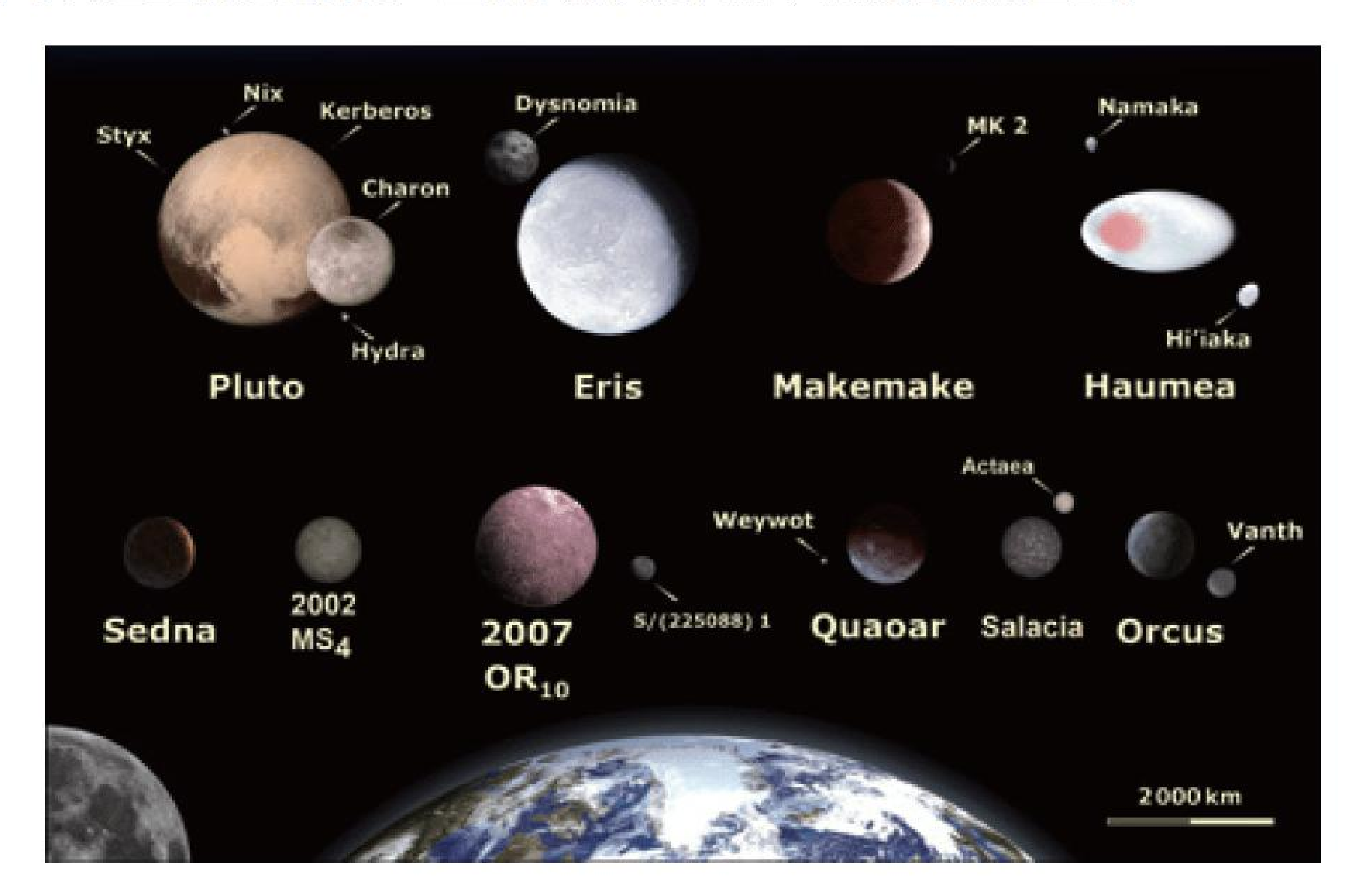


图 12.12 一些最大的海王星外天体

不过，离散盘依然不是太阳系的最边缘。最早发现此事的人，是荷兰天文学家简·奥尔特（图 12.13）。



图 12.13 简·奥尔特

奥尔特曾卷入过一个历史性的事件。1940 年，纳粹德国入侵了荷兰。随后，他们下令解雇荷兰所有大学里的犹太教员。在奥尔特任教的莱顿大学，也有一个相当有名的犹太法学教授遭到解雇。在那名犹太教授被解雇的当天，莱顿大学法学院院长在学校大礼堂里发表了一场著名的演讲，痛斥德国侵略者对荷兰大学的粗暴干涉。演讲结束后，在场的听众竟开始高唱荷兰国歌。这场演讲后来也成为荷兰抵抗运动的标志性事件。当时在场的所有大学教员，包括奥尔特在内，全都因此而受到波及。由于不想向侵略者低头，奥尔特直接辞掉了莱顿大学天文学教授的职务，带着家人搬到了荷兰的一个小村庄，并在那里一直住到德国战败。

“二战”结束后，奥尔特重回莱顿大学，并开始研究彗星（图 12.14）。此后，他一直都在思考这样一个问题：“为什么太阳系里会有这么多的彗星？”

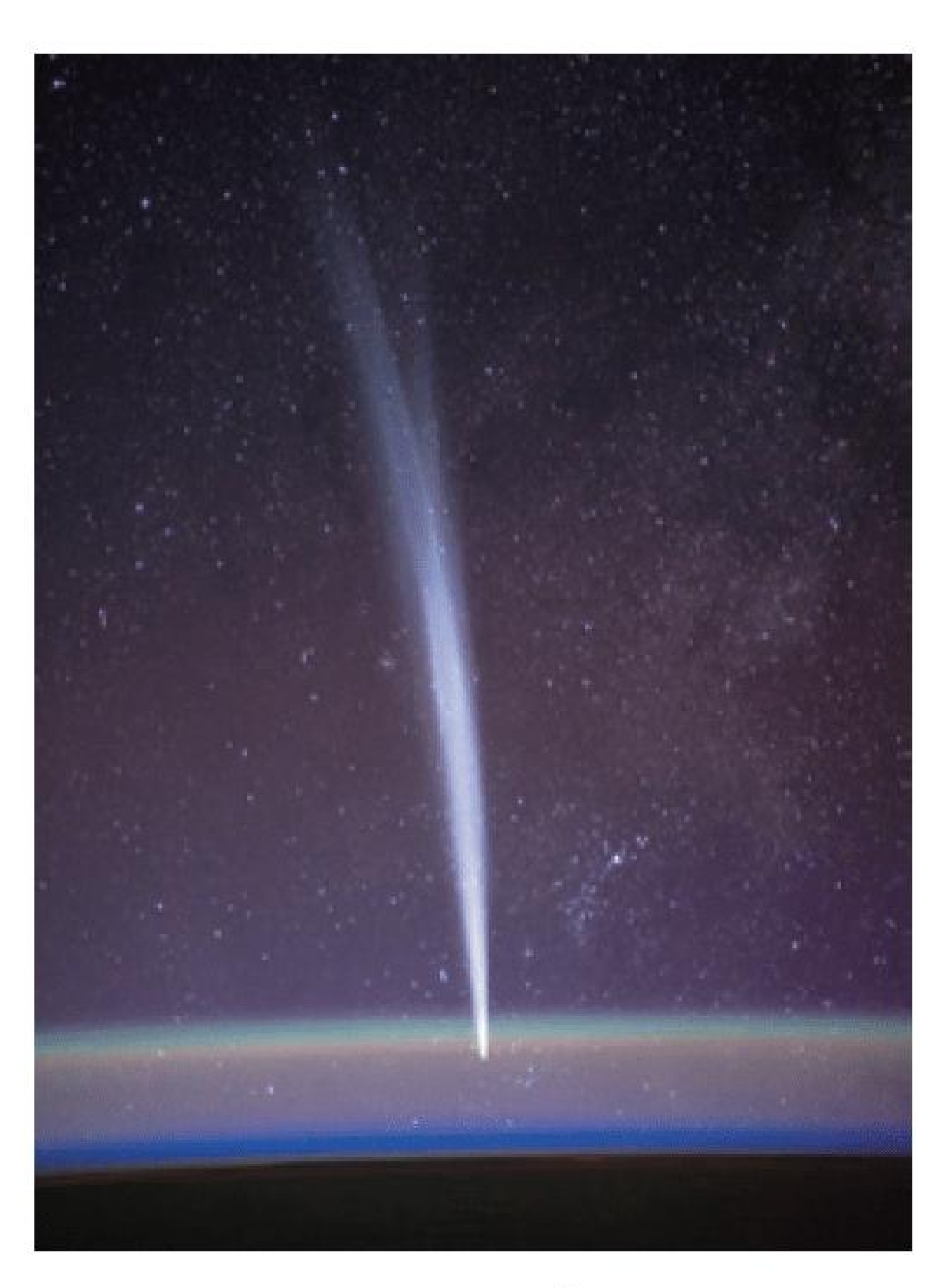


图 12.14 慧星

这个问题似乎有点无厘头，对吧？没关系，我来详细地解释一下。众所周知，彗星是由冰和岩石混合而成的“脏雪球”。当彗星靠近太阳之时，太阳的热辐射会让彗星上的冰升华，进而形成一条长长的彗尾。这个过程会不断消耗彗星上的冰；当所有的冰都消耗殆尽的时候，彗星就不复存在了。那么问题来了：太阳系已经存在了 40 多亿年。为什么经过了如此漫长的岁月，现在竟然还有这么多彗星没被摧毁？

1950 年，奥尔特提出了一个非常大胆的猜想：在太阳系的最外围，还存在着一个巨大的球状气体云，也就是所谓的奥尔特云。它受到太阳引力的束缚，所以依然是太阳系的一部分。此星云是一个巨大的冰库，里面有多达数千万颗彗星。我们现在之所以还能看到这么多的彗星，就是因为有这个大冰库在源源不断地补充。那这个奥尔特云到底离我们有多远呢？目前尚无定论。一般认为，奥尔特云至少能延伸到 1 光年之外；换言之，如果从地球发射一束光，至少要等上整整一年的时间，这束光才能跑到奥尔特云的边缘。

时至今日，人们依然没有找到这个奥尔特云存在的直接证据。但由于它能很好地解释太阳系彗星的来源，现在几乎已经没人会怀疑奥尔特云的真实存在。

我们已经游历了太阳系这个巨大的城市（图 12.15）。它的中心城区总共分为八环，从内到外依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。而它的“郊区”也能分成三部分，分别是柯伊伯带、离散盘和奥尔特云。

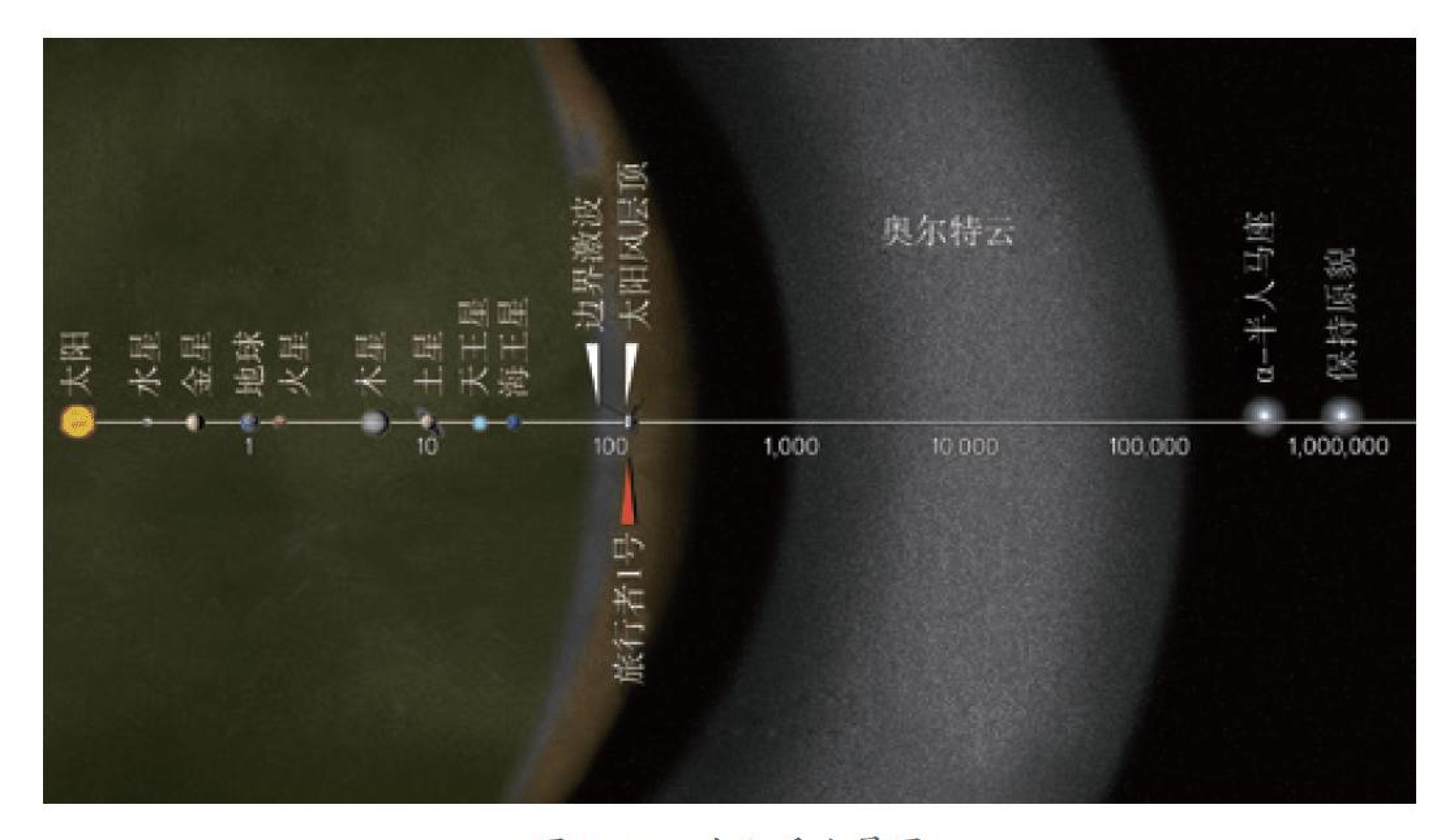


图 12.15　太阳系全景图

现在公众已经普遍接受，太阳系里总共有 8 颗行星（图 12.16）。但在 2016 年，有一个人站了出来，公开反对这个所谓的“常识”。此人不是别人，正是我们的老朋友迈克尔·布朗。

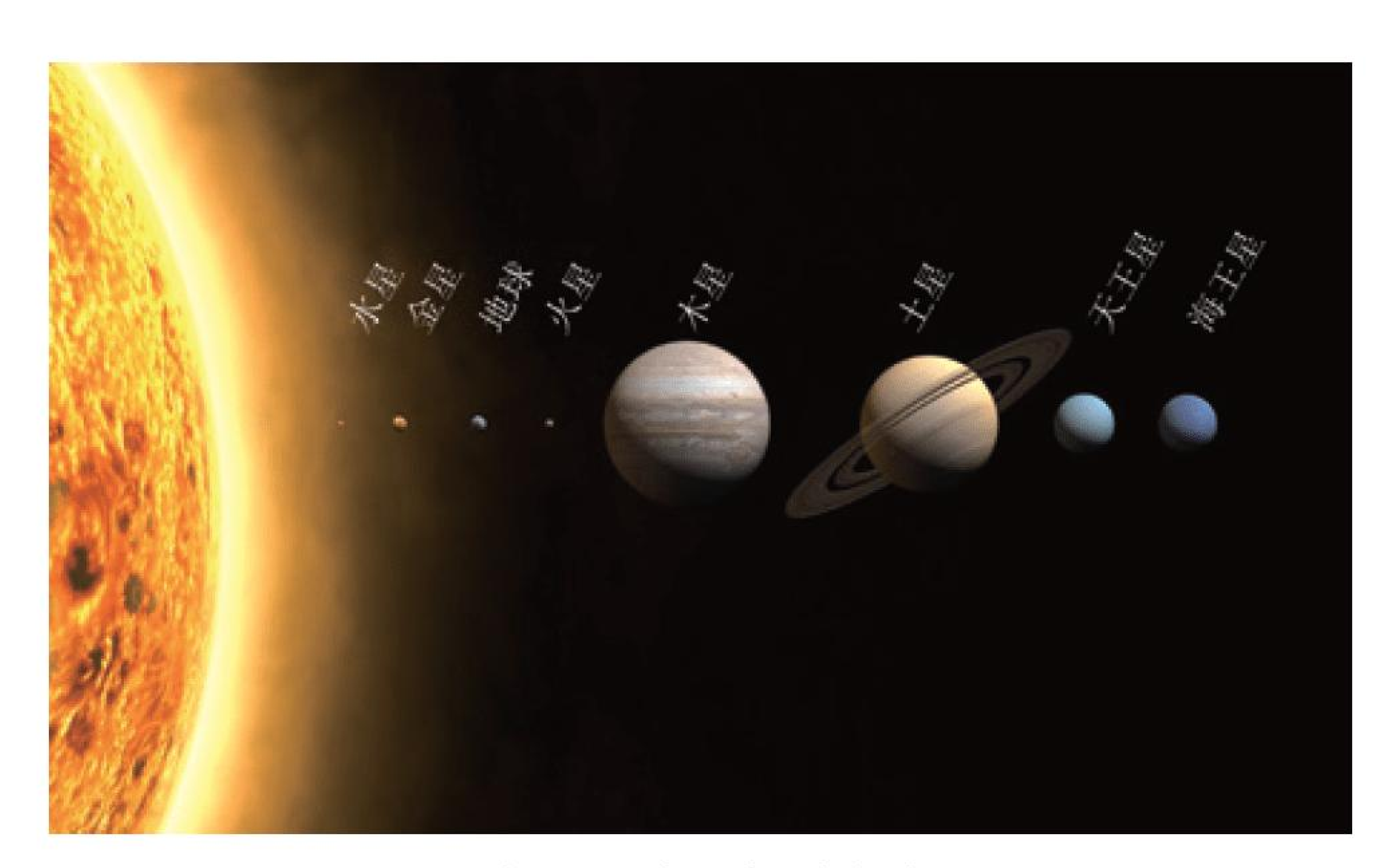


图 12.16　太阳系八大行星

随着观测技术的飞速发展，进入 21 世纪以来，人们陆陆续续地在离散盘上发现了好几个离我们特别远的大块头天体。2016 年 1 月，布朗在《天体物理学杂志》上发表了一篇论文，指出 6 个块头较大的小行星运动轨道存在着明显的异常。从图 12.17 可以看出，这 6 个天体的运动轨道都集中在太阳的同一侧。换句话说，它们几乎都只在太阳的一侧活动，而另一侧则是空空如也。按照布朗的估算，在自然条件下，出现这种状况的概率大概只有万分之一。

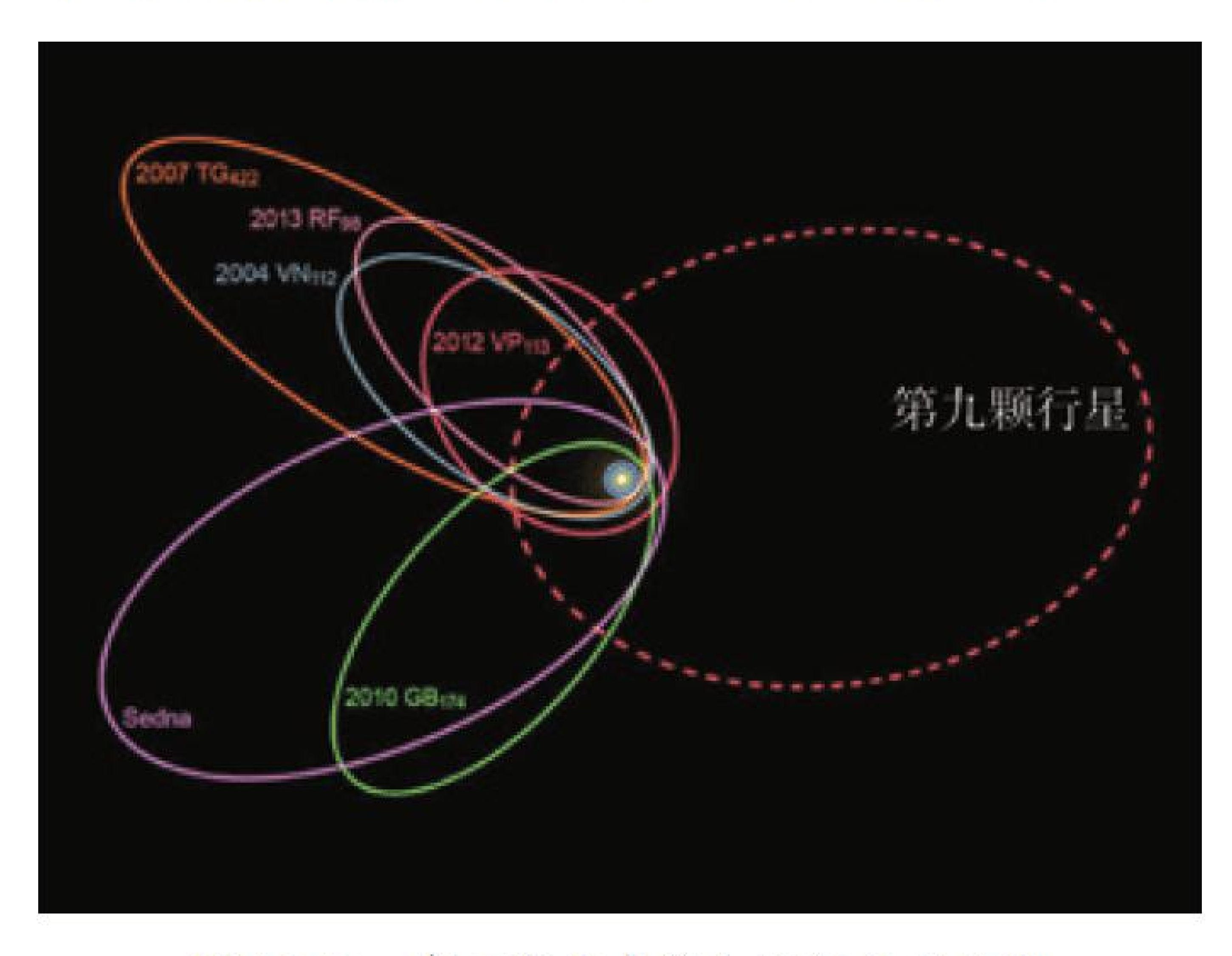


图 12.17　有可能存在第九颗行星的原因

为了解释这些大块头小行星的轨道异常，布朗提出了一个非常大胆的猜想。他认为在太阳的另一侧，还有一个质量能达到地球 10 倍的巨大天体。这个新天体的近日点与太阳相距 200 个天文单位，而它的远日点则与太阳相距 1200 个天文单位。由于公转轨道特别长，它大概要花 1.8 万年才能绕太阳转上一圈。这就是所谓的“第九颗行星”。一旦有第九行星，那 6 颗小行星相对于太阳的分布就不再失衡，它们的轨道异常的难题也就迎刃而解了。

到目前为止，“第九颗行星”还只是一个纯粹的猜想。但最近两年，已经有越来越多的天文学家开始相信第九行星的存在（图 12.17）。布朗对发现第九颗行星充满信心。他认为再过 5 ~ 10 年，我们就能找到这颗新行星的蛛丝马迹。到那时，全世界的中小学课本又将再度改写。

最后再讲个有趣的小故事。布朗的女儿是一个冥王星的忠实粉丝，一直对自己爸爸害冥王星降级的事耿耿于怀。正因为如此，她对布朗预言的第九颗行星感到万分欣喜和期待。她甚至给新行星想好了名字：如果真的能发现这颗新行星，她打算叫它“冥王星”。考虑到她爸爸是迈克尔·布朗，这说不定真的会变成现实。

如果真有那一天，那老冥王星（即现在的“134340 Pluto”）就太悲催了：它不但保不住行星的地位，甚至还保不住自己原来的名字。

我们来做个总结。按照目前的认知，太阳系的中心城区共分为八环，分别对应于八大行星；而它的郊区也能分成三部分，分别是柯伊伯带、离散盘和奥尔特星云。但在 2016 年，有个人站了出来，公开反对太阳系总共有八颗行星的“常识”。此人正是被誉为“冥王星杀手”的迈克尔·布朗。他发现在离散盘上，有 6 个块头较大的小行星运动轨道存在着明显的异常：它们几乎都只在太阳的一侧活动，而另一侧则空空如也。为了解释这些大块头小行星的轨道异常，布朗提出了一个非常大胆的猜想：在太阳的另一侧，还有一个质量能达到地球 10 倍的巨大天体，也就是所谓的“第九颗行星”。如果布朗的猜想是正确的，那么全世界的中小学课本还会再度改写。



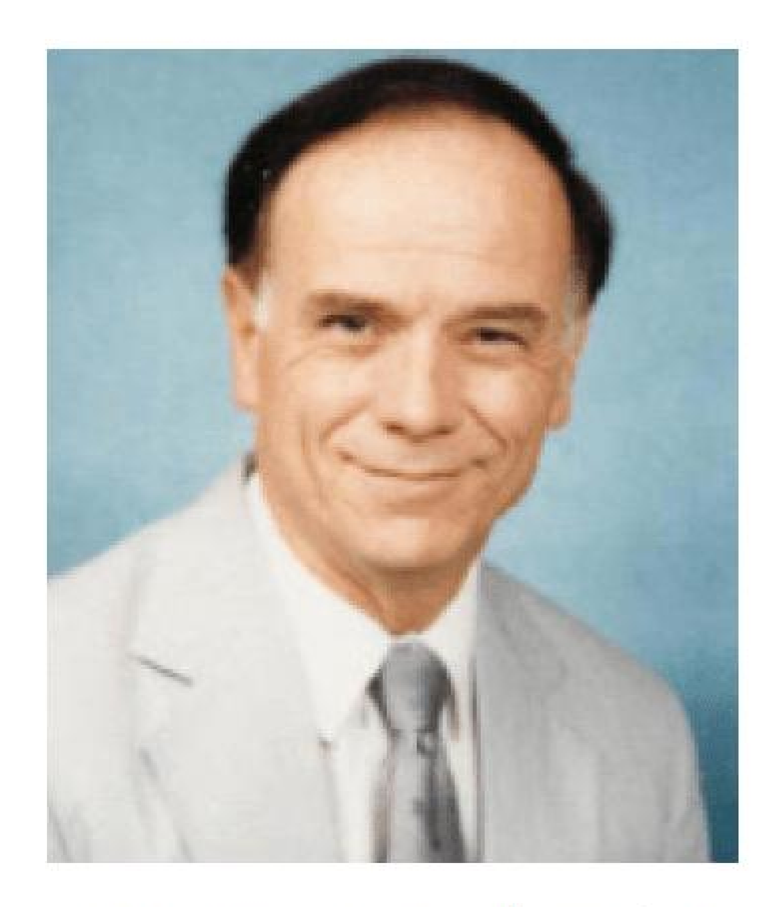
12.4 从遥远太空回望地球是一种什么体验?

2017 年 9 月，为了庆祝两个空间探测器发射 40 周年，NASA 发起了一场网络投票活动，来挑选一句将通过无线电波送给它们的寄语。最后得票最高的那句寄语是，“We offer friendship across the stars. You are not alone.（友谊跨越繁星，你不是孤身一人。）”

当然，那两个收到了这句寄语的空间探测器，就是我们前面经常提到的旅行者号空间探测器（图 12.18）。它们也是人类航天史上最传奇也飞得最远的空间探测器。



图 12.18　旅行者号空间探测器


图 12.19　加里·弗兰德罗

旅行者号的故事要从 1964 年讲起。那年夏天，一个叫加里·弗兰德罗（图 12.19）的研究生，跑到了 NASA 下属的喷气推进实验室去做暑期实习。但实验室资深成员把他当成一个菜鸟，没让他参与比较前沿的研发项目，而是给他找了一份没什么技术含量的差事，让他去计算从地球飞往其他行星都有哪些可能的航线。那段时间，弗兰德罗总觉得自己受到了冷落，这让他颇为沮丧。

尽管情绪低落，弗兰德罗还是兢兢业业地完成了自己的工作。在纸上算了几百条平淡无奇的航线之后，他突然发现了一条意义非凡的航线，也就是图 12.20 所示的这条。弗兰德罗的计算表明，如果在 1977 年按照此图的轨道发射一个航天器，它就可以同时游历木星、土星、天王星和海王星这四大行星！事实上，这是一次百年不遇的机会：如果到 1977 年还不能把空间探测器发射出去，要想有下一次同时游历这 4 个行星的机会，就得再等上整整 176 年。

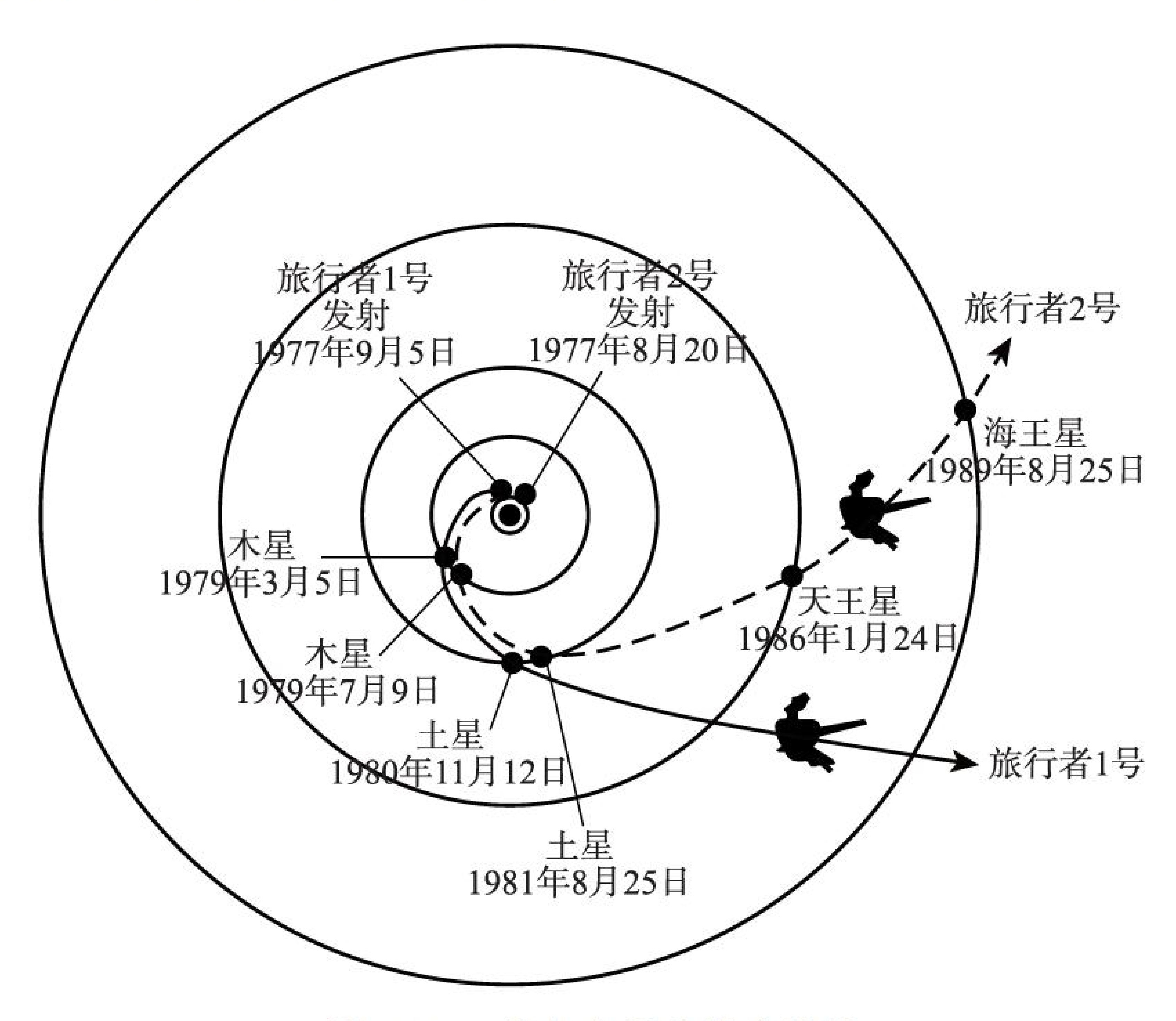


图 12.20　旅行者号的传奇旅程

不过，这也是一个极度疯狂的主意。当时人类的技术水准，勉勉强强能把探测器送到火星。在这种情况下，直接策划同时游历木星、土星、天王星和海王星的航行，其疯狂程度与强迫连出线都很艰难的中国男足直接拿世界杯冠军相差无几。幸好 NASA 向来不缺特别疯狂的人。在经过一系列的论证以后，NASA 决定全力支持弗兰德罗的想法，这就是著名的“大旅行”计划的由来。

自诞生之日起，“大旅行”计划就一直困难重重。为了赶上 1977 年的发射窗口，科学家和工程师们只有短短 12 年的时间来制造能在太空中飞行上百年的探测器。而在此前，他们制造的空间探测器只能飞上区区几年。除了要攻克前所未有的技术难关，“大旅行”计划项目组也要面对另一个巨大的难题，那就是钱。要想完成这么宏大的项目，他们必须从政府那里拿到大量的科研经费；而要想从政府那里拿到大量经费，他们又必须向美国国会证明这次探索具有非同凡响的意义。

时势造英雄。在这个要钱的关键时刻，有个人站了出来，他就是美国著名天文学家、科普作家卡尔·萨根（图 12.21）。

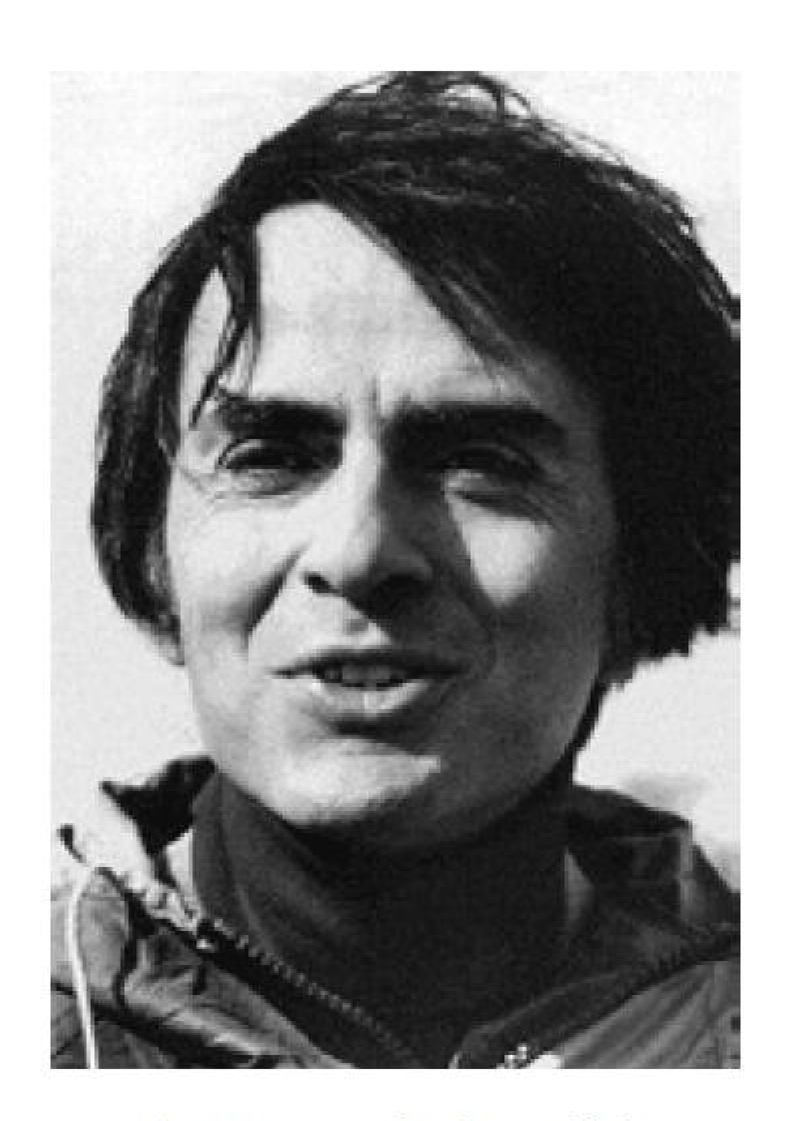


图 12.21　卡尔·萨根

1934 年，卡尔·萨根出生在纽约市的一个移民家庭。5 岁那年，他和父母一起参观了在纽约举办的世界博览会。在这次盛会上，一个非常特别的仪式把他给迷住了，那就是“西屋时间胶囊”的掩埋仪式。“西屋时间胶囊”是由美国西屋电器公司制造的一个大型金属容器，里面放着很多具有时代特色的物品，以及一封爱因斯坦写给后人的信。这个时间胶囊被庄严地埋在纽约法拉盛公园的地下，要在 5000 年后，也就是 6939 年才会被重新打开。这个充满了仪式感的活动，让萨根为之深深着迷。

16 岁那年，萨根考上了芝加哥大学；几年后，他成为大天文学家柯伊伯的博士生。博士毕业后，他先在哈佛大学当了 5 年助理教授，然后又在康奈尔大学当上了正教授。20 世纪 70 年代，萨根加入了 NASA 的“大旅行”计划。或许正是受“时间胶囊”的启发，他提出要在“旅行者号”上放一些具有地球特色的东西。为此，他和同事一起刻录了一张名叫“地球之声”的金唱片（图 12.22）。



图 12.22 “地球之声”的金唱片

这张金唱片里收录了长达 90 分钟的世界各国的音乐、用 55 种不同语言说出的祝福，以及美国总统和联合国秘书长的问候。此外，它也包含了大量的图片和音频，用来展示地球上丰富多彩的生命和文明。萨根希望，如果有朝一日外星生命发现了旅行者号，它们就可以通过这张金唱片来了解我们的世界。这个与外星文明交流的想法，点燃了公众对太空探索的巨大热情。

由于萨根的大力宣传，“大旅行”计划顺利地获得了美国国会的经费支持。1977 年，这个计划的两个空间探测器，旅行者 1 号和旅行者 2 号成功发射。它们一起拜访了木星和土星。随后，两兄弟分道扬镳。旅行者 1 号在近距离地观察了泰坦以后，离开了太阳系所在的平面，并朝银河系中心的方向飞去。而旅行者 2 号则按原定的计划，留在了太阳系平面内，并继续拜访天王星和海王星。目前，它们已经成为人类历史上航行得最远的空间探测器。事实上，它们早已不再是两个单纯的科学仪器，而是人类智慧的两座丰碑。

20 世纪 80 年代初，卡尔·萨根又产生了一个奇妙的想法：他想让已经离开了太阳系平面的旅行者 1 号发挥余热，从遥远太空拍一张回望地球的照片。但当他把这个提案递交给旅行者号项目组的时候，却吃了闭门羹。不少项目组成员都表示反对：“为什么要从那么遥远的地方拍一张地球的照片？这能有什么科学价值？”萨根争辩道，这虽然没有什么科学价值，却有非常重要的人文意义：它将有助于人类理解我们在宇宙中的位置。但遗憾的是，萨根没能说服项目组的那些一根筋的同僚们。

但此时的卡尔·萨根已经今非昔比。早在 1977 年，他就凭借《伊甸园的飞龙》一书获得了著名的普利策奖。而在 1980 年，他更是凭借 13 集电视纪录片《宇宙：个人航行》而名声大噪。此外，他还在 1984 年写了一本颇受欢迎的科幻

小说《接触》，此书后来还被好莱坞改编成了电影（即《超时空接触》）。

已经是名人的萨根，选择不再与项目组的同僚纠缠，而是直接走上层路线。他把自己提出的那个让旅行者 1 号拍地球照片的点子透露给了华盛顿的高层，并获得了他们的支持。随后，华盛顿的高层直接向 NASA 施压，从而让萨根的提案死灰复燃。

1990 年 2 月 14 日，旅行者 1 号转过身，在距离地球大概 60 亿千米的地方，拍下了太阳系诸行星的全家福（图 12.23）。

图 12.24 就是这组全家福中最著名的照片。

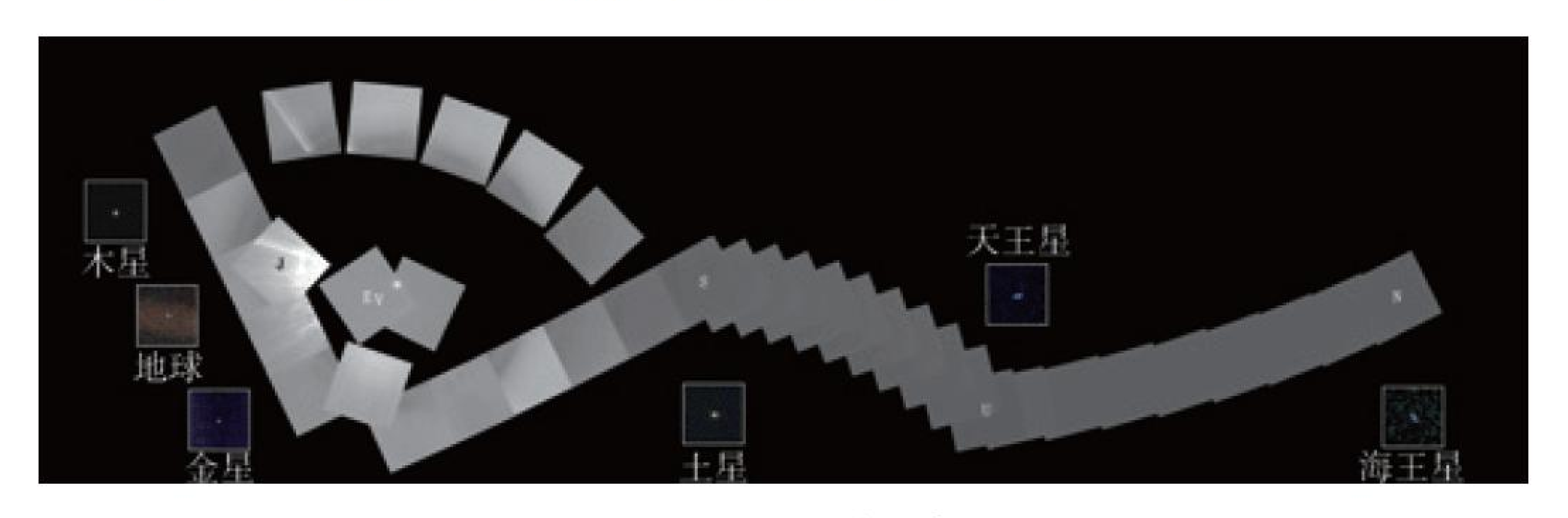


图 12.23　太阳系全家福

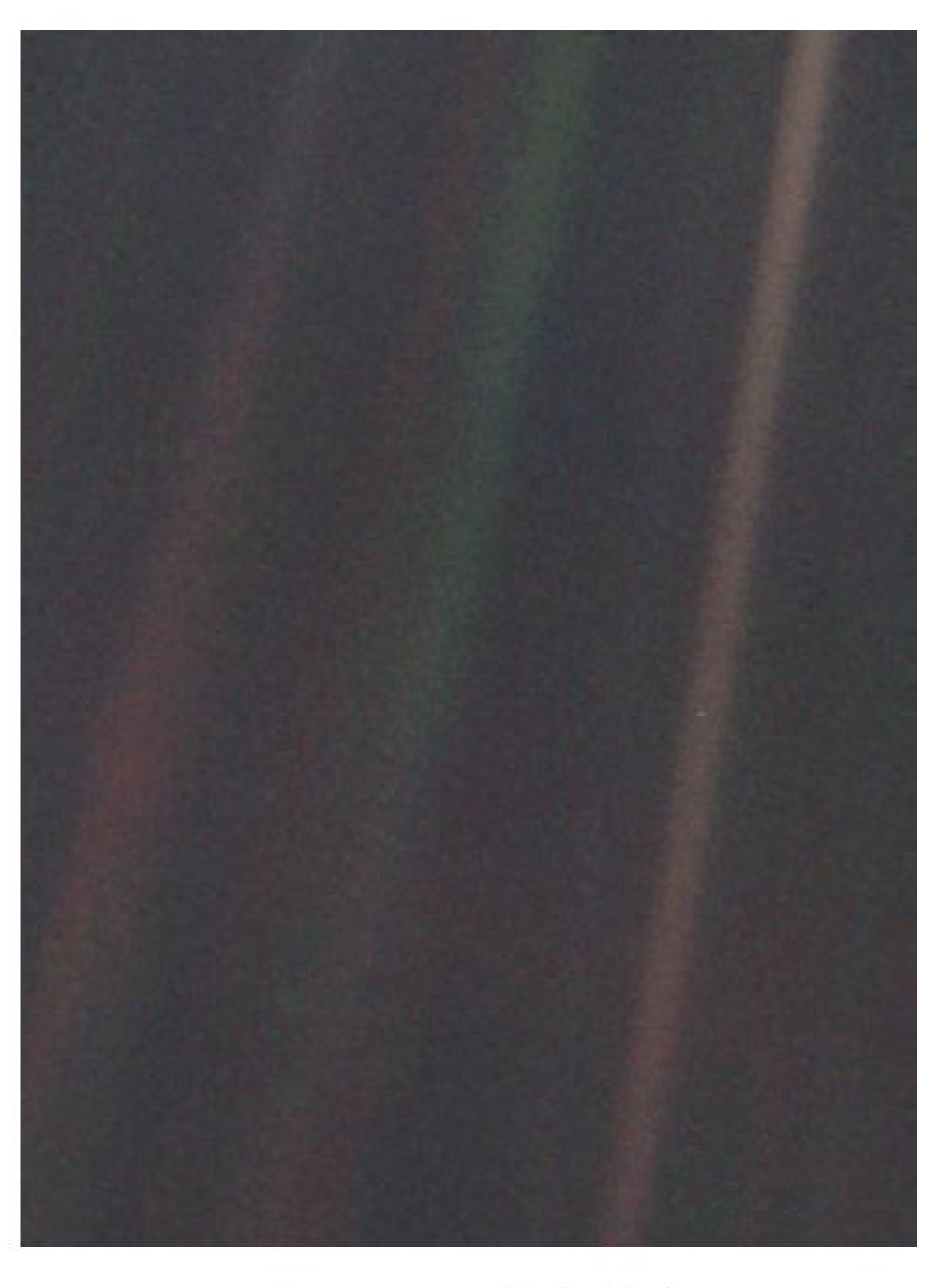


图 12.24　暗淡蓝点

它叫“暗淡蓝点”。大家有没有看到那个图片右侧的小小的圆点？这个放大前的实际尺寸只有十分之一像素的小圆点，就是我们生活的家园——地球。这张照片是历史上最有名的太空图片之一，是迄今为止飞得最远的人造探测器对地球最后的回眸。

关于这张照片，卡尔·萨根在一本名叫《暗淡蓝点》的科普书中这样写道:“再看看这个点吧。它就在那里。那就是我们的家，我们的一切。在它上面，有你爱的、认识的和听说过的每一个人。历史上的每一个人，都在它上面度过了自己的一生。所有的欢乐和痛苦，所有言之凿凿的宗教、意识形态和经济思想，所有的猎人和强盗，所有的英雄和懦夫，所有文明的创造者和毁灭者，所有的皇帝和农夫，所有热恋中的情侣，所有的父母、孩子、发明者和探索者，所有的精神导师，所有的政治家，所有的超级明星，所有的最高领导人，所有的圣徒和罪人，从人类这个种族存在的第一天起——全都在这粒悬浮在太阳光中的尘埃上。”

我们的旅程已经抵达了终点。在这个告别的时刻，我不想再总结什么知识要点，而打算和你聊聊我们下一次的宇宙奥德赛之旅。

如果说这场漫游太阳系的旅程是一次行星世界之旅，那么下一场穿越银河系的旅程就是一次恒星世界之旅。我们将乘坐这艘“宇宙奥德赛”号飞船，径直穿越太阳系所处的猎户座旋臂，并一路飞向银河系的正中心。而在这场旅程中，更多更加美丽、壮观和神奇的风景，也将一一地呈现在我们的眼前。

离别是为了将来更好地相聚。期待在下一次穿越银河系的旅程中，能继续与你同行。

图片来源

1 地球

图 1.1 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Earth_seen_from_Apollo_17.jpg

图 1.2 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aristotle_Altemps_Inv8575.jpg

图 1.3 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Geometry_of_a_Lunar_Eclipse.svg

图 1.4 https://weibo.com/rainywhisper

图 1.6 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:1959_1225_IN2.jpg

图 1.7 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eratosthenes_measure_of_Earth_circumference.svg

图 1.8 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg

图 1.9 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ismaël_Boulliau.jpeg

图 1.10 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Giovanni_Alfonso_Borelli.jpg

图 1.12 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Prinicipia-title.png

图 1.13 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cavendish_Henry_signature.jpg

图 1.14 https://gss1.bdstatic.com/-vo3dSag_xI4khGkpoWK1HF6hhy/baike/c0%3D-baike80%2C5%2C5%2C80%2C26/sign=840bad996d09c93d13ff06a5fe5493b9/f3d3572c11dfa9e-cc70fb18068d0f703918fc100.jpg

图 1.15 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lord_Kelvin_photograph.jpg

图 1.16 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Crossbeddingbressay.jpg

图 1.17 https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/summary/

图 1.18 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ernest_Rutherford_LOC.jpg

图 1.19 百度百科 https://gss1.bdstatic.com/-vo3dSag_xI4khGkpoWK1HF6hhy/baike/c0%3Dbaike 80%2C5%2C5%2C80%2C26/sign=244c5f45c1cec3fd9f33af27b7e1bf5a/58ee3d6d55fbb2fbde48fa9b4d4a20a44723dcdc.jpg

图 1.20 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmosphere_gas_proportions.svg

图 1.21 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Geomagnetisme.svg

图 1.22 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora#/media/File:Aurora_Borealis_and_Australis_Poster.jpg

2 月球

图 2.1 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:FullMoon2010.jpg

图 2.2 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Johannes_Kepler_1610.jpg

图 2.4 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wernher_von_Braun_1960.jpg

图 2.5 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:SKorolow.jpg

图 2.6 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dawn_of_the_Space_Age.jpg

图 2.7 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Apollo_program.svg

图 2.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Apollo_17_The_Last_Moon_Shot_Edit1.jpg

图 2.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aldrin_Apollo_11.jpg

图 2.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Alfred_Wegener_1910.jpg

图 2.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:RA_Daly.jpg

图 2.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Artist%27s_concept_of_collision_at_HD_172555.jpg

3　金星

图 3.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Venus-real_color.jpg

图 3.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:PSM_V78_D326_Ptolemy.png

图 3.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Bartolomeu_Velho_1568.jpg

图 3.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nikolaus_Kopernikus.jpg

图 3.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Heliocentric.jpg

图 3.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Justus_Sustermans_-_Portrait_of_Galileo_Galilei,_1636.jpg

图 3.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Phases-of-Venus.svg

图 3.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:SDO%27s_Ultra-high_Definition_View_of_2012_Venus_Transit_(304_Angstrom_Full_Disc_02).jpg

图 3.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:JeremiahHorrocks.jpg

图 3.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Edmond_Halley_072.jpg

图 3.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Venus_Transit_%26_Parallax.svg

图 3.13　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Simon_Newcomb_01.jpg

图 3.14　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Venus_globe.jpg

图 3.15　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Mapa_de_sondas_sobre_Venus.png

图 3.16　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Mgn_p39146.png

4　水星

图 4.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Mercury_Globe-MESSENGER_mosaic_centered_at_0degN-0degE.jpg

图 4.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ecliptic_path.jpg

图 4.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sign_cusps.png

图 4.4　https://www.msn.com/en-za/video/nerdcore/mercury-retrograde-explained- without-astrology/vp-AAiM4LG

图 4.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ptolemy_16century.jpg

图 4.6　维基百科 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/29/Ptolemaic_elements.svg/1024px-Ptolemaic_elements.svg.png

图 4.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Perihelion_precession.svg

图 4.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Einstein_1921_by_F_Schmutzer_-_restoration.jpg

图 4.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:1919_eclipse_negative.jpg

图 4.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:MESSENGER_-_spacecraft_at_mercury_-_atmercury_lg.jpg

5 太阳

图 5.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sun_white.jpg
图 5.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sir_Isaac_Newton_by_Sir_Godfrey_Kneller,_Bt.jpg
图 5.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Woolsthorpe_Manor#/media/File:Woolsthorpe_Manor_-_west_fascade.jpg
图 5.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration.jpg
图 5.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Joseph_v_Fraunhofer.jpg
图 5.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fraunhofer_lines.svg
图 5.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Bunsen-Kirchhoff.jpg
图 5.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Gustav_Kirchhoff#/media/File:Kirchhoffs_first_spectroscope.jpg
图 5.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Emission_spectrum-H.svg
图 5.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Arthur_Stanley_Eddington.jpg
图 5.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:IvyMike2.jpg
图 5.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hans_Bethe.jpg
图 5.13　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sommerfeld1897.gif
图 5.14　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:FusionintheSun.svg
图 5.15　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:CNO_Cycle.svg
图 5.16　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pauli.jpg
图 5.17　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Raymond_Davis,_Jr_2001.jpg
图 5.18　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Arthur_B._McDonald_5193-2015.jpg
图 5.19　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sudbury_Neutrino_Observatory.detector_outside.jpg
图 5.20　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot#/media/File:Solar_Archipelago_-_Flickr_-_NASA_Goddard_Photo_and_Video.jpg
图 5.21　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Massive_X-Class_Solar_Flare.jpg
图 5.22　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Giant_prominence_on_the_sun_erupted.jpg
图 5.23　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Prof._Eugene_Parker_from_University_of_Chicago.jpg
图 5.24　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Parker_Solar_Probe.jpg

6 火星

图 6.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:OSIRIS_Mars_true_color.jpg
图 6.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tycho_Brahe.JPG
图 6.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Uraniborgskiss_90.jpg
图 6.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tychonian_system.svg
图 6.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Stamps_of_Germany_(DDR)_1971,_MiNr_1649.jpg
图 6.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Percival_Lowell_1900s2.jpg
图 6.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pickering-Johnson.jpg
图 6.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Scamander_Vallis_from_Mars_Global_Surveyor.jpg

图 6.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:NASA_Mars_Rover.jpg
图 6.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:AncientMars.jpg
图 6.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Elon_Musk_2015.jpg

7　小行星世界

图 7.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:InnerSolarSystem-en.png
图 7.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Johann_Daniel_Titius.jpg
图 7.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Johann_Elert_Bode.jpg
图 7.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Giuseppe_Piazzi.jpg
图 7.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Carl_Friedrich_Gauss_1840_by_Jensen.jpg
图 7.6　维基百科https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ceres_-_RC3_-_Haulani_Crater_(22381131691)_(cropped).jpg
图 7.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ceres,_Earth_%26_Moon_size_comparison.jpg
图 7.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Vesta_in_natural_color.jpg
图 7.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Olympus_Mons_PIA02806.jpg
图 7.11　维 基 百 科 https://en.wikipedia.org/wiki/Rheasilvia#/media/File:PIA15667_Vesta_south_pole_oblique.jpg
图 7.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/HED_meteorite#/media/File:HED_meteorites.jpg
图 7.14　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Conic_section#/media/File:Eccentricity.svg
图 7.15　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Oumuamua_orbit_at_perihelion.png
图 7.16　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Artist%27s_impression_of_‘Oumuamua.jpg

8　木星

图 8.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Jupiter_and_its_shrunken_Great_Red_Spot.jpg
图 8.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Great_red_spot_juno_20170712.jpg
图 8.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:13_Portrait_of_Robert_Hooke.JPG
图 8.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Great_Red_Spot_From_Voyager_1.jpg
图 8.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Redjunior.jpg
图 8.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Juno_Transparent.png
图 8.7　NASA：https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/pia22335-16.jpg
图 8.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eugene_Shoemaker.jpg
图 8.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Meteorcrater.jpg
图 8.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Tycho_(lunar_crater)#/media/File:Tycho_LRO.png
图 8.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Carolyn_Shoemaker.jpg
图 8.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:David_H._Levy.jpg
图 8.13　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Édouard_Roche.jpg
图 8.14　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Shoemaker-Levy_9_on_1994-05-17.png
图 8.15　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Jupiter_showing_SL9_impact_sites.jpg
图 8.16　维 基 百 科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Galilean_satellites_(the_four_largest_moons_of_

Jupiter).tif

图 8.17　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Galilean_moons#/media/File:Masses_of_Jovian_moons.png

图 8.18　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ole_Rømer_(Coning_painting).jpg

图 8.19　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Illustration_from_1676_article_on_Ole_Rømer%27s_measurement_of_the_speed_of_light.jpg

图 8.20　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Io_highest_resolution_true_color.jpg

图 8.21　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Europa-moon.jpg

图 8.22　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Artwork_Galileo-Io-Jupiter.JPG

图 8.23　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Faraday-Millikan-Gale-1913.jpg

图 8.24　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hans_Christian_Ørsted_daguerreotype.jpg

图 8.25　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Induction_experiment.png

图 8.26　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:James_Clerk_Maxwell.png

图 8.27　https://apod.nasa.gov/apod/image/1205/EuropasOcean_KPHand003.jpg

图 8.28　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Blacksmoker_in_Atlantic_Ocean.jpg

9　土星

图 9.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Saturn_during_Equinox.jpg

图 9.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens.jpg

图 9.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens_Clock_and_Horologii_Oscillatorii.jpg

图 9.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Saturn_Robert_Hooke_1666.jpg

图 9.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Giovanni_Cassini.jpg

图 9.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pierre-Simon,_marquis_de_Laplace_(1745-1827)_-_Guérin.jpg

图 9.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:PIA17172_Saturn_eclipse_mosaic_bright_crop.jpg

图 9.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:YoungJamesClerkMaxwell.jpg

图 9.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Saturn_Ring_Material.jpg

图 9.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Unraveling_Saturn%27s_Rings.jpg

图 9.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:PIA17202_-_Approaching_Enceladus.jpg

图 9.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cassini_Saturn_Orbit_Insertion.jpg

图 9.13　NASA：https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/pia19656_labeled.jpg

图 9.14　NASA：https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/pia21442_updated.jpg

图 9.15　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Titan_in_true_color.jpg

图 9.16　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Titan-Complex_%27Anti-greenhouse%27.jpg

图 9.17　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Cassini-Huygens#/media/File:Huygens_surface_color_sr.jpg

图 9.18　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:PIA17655_crop_Titan_north_polar_seas_and_lakes.jpg

图 9.19　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Corryvreckan_Whirlpool_-_geograph-2404815-by-Walter-Baxter.jpg

图 9.21　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:2014_June_Astrobiology_and_Theology_seminer_04.JPG

10　天王星

图 10.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Uranus2.jpg

图 10.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:William_Herschel01.jpg

图 10.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Herschel_40_foot.jpg

图 10.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:HerschelTelescope.jpg

图 10.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Uranian_Magnetic_field.gif

图 10.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Waltermelsasser.jpg

图 10.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Outer_core_convection_rolls.jpg

图 10.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:PIA18185_Miranda%27s_Icy_Face.jpg

图 10.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Northern_Areas_68.jpg

图 10.12　http://www.erikwernquist.com/wanderers/images/gallery/WANDERERS_verona_rupes_03.jpg

图 10.13　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Iron_Man_bleeding_edge.jpg

11　海王星

图 11.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Neptune_Full.jpg

图 11.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Alexis_Bouvard.jpg

图 11.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:John_Couch_Adams_1870s.jpg

图 11.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:George_Biddell_Airy_1891.jpg

图 11.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Urbain_Le_Verrier.jpg

图 11.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:JohannGalle.jpg

图 11.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Neptune's_Great_Dark_Spot.jpg

图 11.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hato_2017-08-23_0250Z.jpg

图 11.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Haiyan_Nov_7_2013_1345Z.png

图 11.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Neptune_storms.jpg

图 11.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Triton_moon_mosaic_Voyager_2_(large).jpg

图 11.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:William_Lassell.jpg

图 11.13　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Triton_(artist%27s_impression).jpg

图 11.14　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Triton_orbit_%26_Neptune.png

12　太阳系边缘

图 12.1　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_sys8.jpg

图 12.2　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Kuiper_belt_plot_objects_of_outer_solar_system.png

图 12.3　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gerard_Kuiper_1964b.jpg

图 12.4　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Clyde_W._Tombaugh.jpeg

图 12.5　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pluto_discovery_plates.png
图 12.6　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nh-pluto-in-true-color_2x_JPEG-edit-frame.jpg
图 12.7　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pluto's_Heart_-_Like_a_Cosmic_Lava_Lamp.jpg
图 12.8　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pluto,_Earth_%26_Moon_size_comparison.jpg
图 12.9　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pluto-Charon-v2-10-1-15.jpg
图 12.10　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Michael_E_Brown_1.jpg
图 12.11　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Artist%27s_impression_dwarf_planet_Eris.jpg
图 12.12　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:EightTNOs.png
图 12.13　https://en.wikipedia.org/wiki/File:JanOort.jpg
图 12.14　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Iss030e015472_Edit.jpg
图 12.15　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:PIA17046_-_Voyager_1_Goes_Interstellar.jpg
图 12.16　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Planets2013.svg
图 12.17　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Planet_Nine#/media/File:Planet_Nine_animation.gif (实际是此动画的一张截图 12)
图 12.18　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Voyager_probes_with_the_outer_worlds.jpg
图 12.19　此图是 BBC 纪录片《旅行者号：冲出太阳系》的一张截图
图 12.20　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Voyager_Path.svg
图 12.21　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Carl_Sagan_-_1980.jpg
图 12.22　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Sounds_of_Earth_-_GPN-2000-001976.jpg
图 12.23　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Family_portrait_(Voyager_1).png
图 12.24　维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pale_Blue_Dot.png

致　　谢

我要感谢我学生时代的博士生导师李淼教授。除了在学术上给了我许多教导，李淼老师也是我科普之路上的灯塔。正是由于他的邀请，我才得以与他合写科普畅销书《给孩子讲宇宙》和《给孩子讲相对论》，从而开启自己的科普写作生涯；此外，如果没有他的督促和鼓励，我根本不会去新浪写科普微博，自然就不可能写出这本书。

我也要感谢本书的责任编辑胡洪涛老师。胡洪涛老师花了大量的时间精力，与我详细讨论了本书的选题、创作和宣传事宜。如果没有他的帮助、鼓励和支持，这本书根本就无法完成。

感谢本书的文字编辑王华老师。王华老师经常与我在微信上交流，并为本书做了大量的文字编辑工作。

感谢“逻辑思维”公司的曾捷老师。以前我给“得到 APP”写知识新闻的时候，曾捷老师一直是我的主编。他向我传授了用“口语化”的方式进行知识传播的诀窍，从而帮助我实现了从一个科研工作者到一个科普作者的蜕变。

感谢科学传播界的意见领袖徐来老师。徐来老师经常在百忙之中抽出时间，耐心地为我答疑解惑。此外，对于如何在科普写作中打造个人特色和“护城河”，徐来老师也对我进行了很多的指导。

感谢著名科普漫画作者李剑龙（网名“松鼠会 Sheldon”）老师。李剑龙老师推荐我加入了“科学松鼠会”。此外，与他在中科大开会时的交流也让我受益匪浅。

感谢著名科普作家曹天元老师和汪诘老师。他们抽出了不少时间来阅读本书，还写下了很好的推荐语。

感谢所有持续关注我的新浪微博的网友。在你们的支持和鼓励下，# 宇宙奥德赛 # 的话题阅读量在一年内就超过了 2.3 亿，这给了我一直写下去的信念和决心。

感谢我的母亲。您为我付出的实在是太多太多。

本书献给我的父亲。相信有一天，您的在天之灵会为我而骄傲。